

Friedrich Wezel

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE
WILLKÜRBEWEGUNG DER MENSCHLICHEN HAND
MIT GETASTET DARGEBOTENEN REIZMUSTERN

3
Frankfurt am Main 1962



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554805_0064

Aus dem Institut für Animalische Physiologie der Universität
Frankfurt am Main
(Direktor: Prof. Dr. med. K. Wezler)

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE WILLKÜRBEWEGUNG DER MENSCHLICHEN HAND
MIT GETASTET DARGEBOTENEN REIZMUSTERN

Inaugural - Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin

der hohen Medizinischen Fakultät
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
zu Frankfurt am Main

vorgelegt von
Friedrich W e z e l
aus Greiz / Thüringen

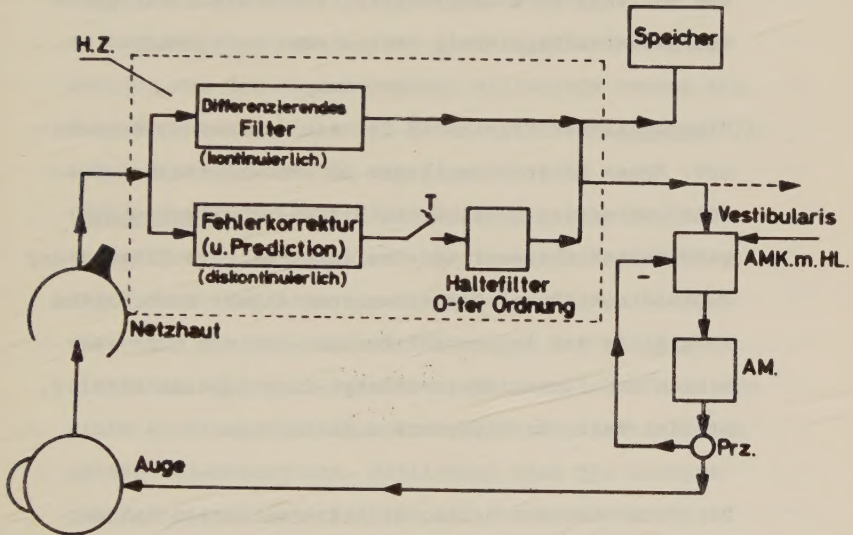
Frankfurt am Main 1962



Dekan: Prof. Dr. Krücke
Referent: Priv. Doz. Dr. Vossius
Korreferent: Prof. Dr. Zutt

Mündliche Prüfung: 13. 3. 1963

Nach den augenblicklich gültigen Vorstellungen vom Regelsystem der Augenbewegung setzt sich dieses aus einem äußeren und einem ihm untergeordneten inneren Regelkreis zusammen.



Schematische Darstellung des gesamten Regelsystems der Augenbewegung. H.Z. = Höhere Zentren; AMK.m.h.L. = Augenmuskelerne mit hinterem Längsbündel; AM. = Augenmuskeln; Prz. = Propriozeptoren (nach Vossius).

Die Retina mißt als Rezeptor des äußeren Regelkreises den Wert der Abweichung der Fovea centralis von dem Punkt der Netzhaut, auf dem der betrachtete Gegenstand abgebildet wird, und teilt ihn über aufsteigende Nervenbahnen den höheren optischen Zentren im Großhirn mit. Diese werten ihn aus und geben den niederen Zentren der

Augenmuskelkerne eine entsprechende Korrekturgröße weiter, die dann als Stellbefehl über motorische Nervenbahnen den Augenmuskeln zugeführt wird. Nach erfolgter Einstellbewegung des Bulbus mißt die Retina erneut, und eine eventuell noch vorhandene Abweichung vom Sollwert wird ausgeregelt, indem die Fehlergröße den gesamten Regelkreis noch einmal durchläuft.

Diesem äußeren Regelkreis ist ein innerer untergeordnet. Seine Rezeptoren liegen in den Augenmuskelspindeln und messen laufend die Differenz zwischen dem geforderten Sollwert und dem tatsächlichen Istwert der Muskeleinstellung. Die Auswertung dieser Information erfolgt in den Augenmuskelkernen, und von dort aus werden den Augenmuskeln solange neue Impulse erteilt, bis der Wert der Differenz null beträgt.

Die Totzeiten der beiden Regelkreise unterscheiden sich wesentlich voneinander; sie betragen für den äußeren 100 bis 150 msec., für den inneren nur 5 bis 10 msec.

Die das optische Signal auswertenden höheren Zentren im Gehirn stellen ihren unterschiedlichen Funktionen nach ein zusammengesetztes System dar: Es besteht aus einem kontinuierlichen Filter mit einer niedrigen Grenzfrequenz von 3 - 5 Hz, das nur auf die Geschwindigkeit der Erregungsänderung des Musters anspricht, und einem dazu parallel geschalteten Filter, das in diskonti-

nuierlichen Abständen von mindestens 100 msec. den Ortswert des Musters abtastet und die vom kontinuierlichen Filter bewirkte Einstellung korrigiert (Vossius(11)).

Nach den bisher vorliegenden Untersuchungen ist der Aufbau des Regelkreises der gezielten Handbewegung ähnlich dem der Augenbewegung, allerdings vermag die Hand Frequenzen bis zu 10 Hz auszuführen (Altrock(1)), während die Grenze für das Auge bei 3 Hz liegt (Sünderhauf(6)). Regelstrecke ist die von der Hand auszuführende Bewegung; die Retina erfaßt als Fühler des äußeren Regelkreises die Abweichung von der gewünschten Einstellung und informiert die als Regler wirkenden höheren Hirnzentren, die sich ebenfalls aus einem kontinuierlichen und einem diskontinuierlichen Anteil zusammensetzen. Stellglied sind die entsprechenden motorischen Zentren der Armmuskulatur im Rückenmark. Als Rezeptoren des inneren Regelkreises kommen neben den propriorezeptiven Sinnesorganen der Arm- und Handmuskulatur die Fühler der Tiefensensibilität der Gelenke und die der Hautsensibilität infrage; der Sitz des Reglers liegt in den entsprechenden Rückenmarkszentren, und Stellglied sind wieder die Armmuskeln. In seinem Wirkungsmechanismus entspricht der innere Regelkreis ebenfalls dem der Augenbewegung.

Das kontinuierliche Filter besitzt nach Mayne (3) und Altrock (1) bis zu einem Frequenzbereich von 2 Hz eine

Vorhersagefähigkeit für einfache Sinusschwingungen, die sich in einem deutlichen Phasenvorhalt der Folge gegenüber der Vorgabekurve ausdrückt. Diese Prediction-Eigenschaft verliert es aber, wenn man anstelle eines Sinus periodische Mischungen mehrerer einfacher harmonischer Schwingungen oder nichtperiodische, also unvorhersagbare Muster anbietet (Mayne (3), Tustin (7), Ellson (2) sowie Stark und Mitarbeiter (5)). Die Antwortkurven weisen dann einen z.T. erheblichen Phasen-nachhalt auf.

Aus den Versuchen von Altrock (1) über die Regelbewegung der Hand ergab sich, daß bis zu einer Frequenz von 3 Hz einfachen Sinusschwingungen frequenzgetreu gefolgt wird, daß aber in höheren Bereichen die Folgefrequenz mit der Vorgabe nicht mehr ganz übereinstimmt. Daraus läßt sich schließen, daß die höheren Zentren sich nicht als einfaches passives System im herkömmlichen Sinne verhalten, sondern daß vielmehr die Erregungsmuster aufgenommen, verarbeitet und nachgebildet werden. In dieser Richtung weitergeführte Versuche von Vossius und Hummel (10) mit nichtperiodischen und "einfach" oder "kompliziert" erscheinenden periodischen Mischungen einfacher harmonischer Schwingungen, deren Oberwellen in verschiedenen Phasenbeziehungen zueinander standen, bestätigten diese Theorie der Musternachbildung.

Es zeigte sich, daß die Qualität der Wiedergabe in dem Maße abnimmt, in dem die Vorgabe "komplizierter" wird, und sowohl bei nichtperiodischem als auch bei "kompli-

ziertem" periodischem Zeitverlauf des Musters ergab die Analyse, daß sich (besonders im höheren Frequenzbereich) eigene, in der Vorgabe nicht enthaltene, Frequenzen einstellen.

In orientierenden Versuchen über die Augenbewegung hatte Westheimer (12) festgestellt, daß getastet angebotenen Sinusschwingungen kontinuierlich gefolgt wird. Auch Versuche von Vossius (8) mit stroposkopischer Kontrolle der Handbewegung zeigten bis zu gewissen Tastabständen einen ungestörten Ablauf der Bewegung. Das heißt also, daß auch bei einer Tastung entweder des Signals oder des kontrollierenden Meßorgans die Bewegung noch durchaus sinnvoll ausgeführt werden kann.

Es ist deshalb von besonderem Interesse, genau zu untersuchen, wie die Handbewegung erfolgt, wenn das optische Muster nur getastet angeboten wird, und wie sich das Verhältnis der Tastfrequenz zur Frequenz der Vorgabe verhalten muß, wenn eine sichere Folgebewegung erzielt werden soll.

M e t h o d i k

Der Versuchsaufbau entsprach im Prinzip dem schon von Vossius und Choudhry (9) sowie Altrock (1) beschriebenen: Mittels eines Spiegelgalvanometers wurde das Erregungsmuster auf einer Mattscheibe als hin- und herwandernder 2 mm breiter Lichtstreifen dargestellt, dem die Versuchsperson (Vp.) mit einer punktförmigen roten Lichtmarke zu folgen hatte. Diese wurde aus dem von der Versuchsperson bedienten Folgehebel ausgestrahlt und etwas unterhalb der Vorgabe gleichfalls auf die Mattscheibe projiziert.

Durch ein am gleichen Hebelarm angebrachtes Potentiometer wurde die Bewegung in eine Widerstandsänderung umgesetzt und die so am Schleifer erzeugte Spannungsänderung eines vorgegebenen Gleichstromes als Folgekurve gleichzeitig mit der Vorgabe auf einem Elektrokardiographen der Fa. Siemens (Cardirex) registriert.

Um das Muster getastet anbieten zu können, wurde der auf den Spiegel fallende Lichtstrahl abgedeckt und nur in bestimmten Zeitintervallen freigegeben. Das erfolgte durch eine rotierende kreisförmige Scheibe von 20 cm Durchmesser, aus deren Peripherie vier, wahlweise abdeckbare, Segmente mit einem Winkel von $8^{\circ} 30'$ ausgeschnitten waren und deren Umdrehungszahl stufenlos verändert werden konnte. Dabei wurde darauf geachtet, daß sich die Dauer der Lichtsignale immer in

Grenzen von 4 bis 40 msec. hielt. Durch die Anzahl der freien Schlitze und die Anzahl der Umdrehungen der Scheibe pro Sekunde konnte die Abtastfrequenz beliebig variiert werden. Eine simultane Kontaktunterbrechung ermöglichte die exakte Registrierung des Zeitpunktes und der Dauer der Lichtunterbrechung auf einem getrennten Kanal des E K G - Schreibers.

Alle im Verlauf der einzelnen Versuchsreihen verwendeten Erregungsmuster wurden auf elektrischem Wege erzeugt; die sinus- und dreieckförmigen Schwingungen wurden einem Tieffrequenzgenerator der Fa. Hewlett & Packard / Californien entnommen; die Mischfrequenzen erhielten wir durch Addition verschiedenfrequenter Sinusschwingungen gleicher Amplitude in einem Widerstandsadditionsnetzwerk.

Die Versuche fanden in einem völlig abgedunkelten Raum statt und wurden vorwiegend von einer weiblichen und drei männlichen Versuchspersonen im Alter von 22 bis 26 Jahren ausgeführt. Aus den Vorversuchen und den Versuchen ohne Tastung hatte sich ergeben, daß die Kenntnis der Versuchsbedingungen und der vorgegebenen Kurven die Ergebnisse beeinflussen. Deshalb wurde bei allen Versuchen streng darauf geachtet, daß die angebotenen Muster den Versuchspersonen nicht bekannt waren; nur die Versuche, bei denen im Anfang bewußt geübt und gelernt werden sollte, waren davon ausgenommen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte für die einzelnen Ver-

suchsreihen in verschiedener Weise: Die Versuche mit einfachen Sinusschwingungen bei fest eingestellter Abtastung und variiertter Vorgabe oder fest eingeübter Vorgabe und Änderung der Tastung wurden optisch quantitativ auf das Frequenzverhalten der Folge gegenüber der Vorgabe in verschiedenen Frequenzen und mit unterschiedlichen Abtastverhältnissen untersucht. Die Versuche mit wechselnden dreieck- und sinusförmigen Mustern und die mit "einfachen" periodischen Mischungen harmonischer Schwingungen (ihre Zusammensetzung wird später im Kapitel der Versuchsbeschreibung erläutert) wurden zunächst optisch vorsortiert und danach stichpunktartig für jeden einzelnen Versuch charakteristische Kurvenstücke ausgewählt und nach der Fourier - Analyse ausgewertet; für die nichtperiodischen Muster wurden Leistungsspektren der Vorgabe- und Folgekurven aufgestellt. Die Errechnung der Ergebnisse erfolgte auf einer elektronischen Rechenmaschine vom Typ IBM 650. ¹⁾ Dazu wurden die für die Analyse ausgewählten Schwingungen in eine bestimmte Anzahl von gleichen Stützstellen

1) An dieser Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. A. Walther, dem Direktor des Institutes für praktische Mathematik der Technischen Hochschule Darmstadt, recht herzlich dafür danken, daß ich die in seinem Institut aufgestellte elektronische Rechananlage zur Auswertung meiner Ergebnisse benutzen durfte.

Gleichzeitig möchte ich Herrn Priv. Doz. Dr. Vossius und Herrn cand. ing. J. Schröter für die Programmierung und Ausführung der Rechnung meinen Dank sagen.

so unterteilt, daß auch auf die höchste in der Kurve vorhandene Oberwelle noch mindestens zehn Stützpunkte entfielen; z.B. wurden eine Mischung aus drei Sinusschwingungen von 1,2 und 3 Hz mit 30 Stützstellen erfaßt, die Sinus- und Dreieckkurven sogar mit 50, um auch höhere Frequenzanteile noch sicher darzustellen.

Versuche und ihre Ergebnisse

Es wurden vier verschiedene Serien von Versuchen durchgeführt:

1. Änderung der Frequenz des vorgegebenen sinusförmigen Musters bei jeweils konstanter Tastfrequenz.
2. Änderung der Tastfrequenz bei konstantem, geübtem sinusförmigem Vorgabemuster.
3. Wechsel von getastetem sinusförmigem und dreieckförmigem Vorgabemuster.
4. Tastung von Mischungen harmonischer Schwingungen.

1. Änderung der Frequenz des vorgegebenen sinusförmigen Musters bei jeweils konstanter Tastfrequenz.

Eine bestimmte Tastfrequenz wurde fest eingestellt und die Frequenz der vorgegebenen Sinusschwingung stufenförmig in einem Verhältnis der Tastung zur Vorgabe von 1 : 1, 4 : 3, 2 : 1, 4 : 1 und 8 : 1 gesenkt, in einer anderen Versuchsreihe von 8 : 1 bis 1 : 1 erhöht. Diese Versuche wurden von zwei Personen ohne vorherige Übung durchgeführt.

Es zeigte sich bei den Versuchen mit konstanter Tast- und abnehmender Vorgabefrequenz, daß die Versuchspersonen zunächst erfolglos versuchen, sich auf die vorgegebenen Frequenzen einzustellen. Erst, wenn die Vorgabe bis zu einem Verhältnis von 2 : 1 (Tastfrequenz : Vorgabefrequenz) gesenkt wird, gelingt erst-

mals eine frequenzgetreue Folge, die aber für die nächst niedrigeren Vorgabefrequenzen sofort wieder verlorengeht. Erst ab einem Verhältnis von 4 : 1 vermag die Versuchsperson sicher jeder weiteren Frequenz zu folgen. Für die Tastfrequenz von 8 Hz lag die Grenze sogar bei 8 : 1, die erste Folge bei 4 : 1 (Tabelle 1). In den Versuchen mit konstanter Tast- und ansteigenden Vorgabefrequenzen wurde anfangs eine so niedrige Vorgabefrequenz gewählt, daß das Tastverhältnis zu einer sicheren Befolgung der Vorgabekurve ausreichte. Dann wurde die Frequenz der Vorgabe sprunghaft gesteigert, und dabei ergab sich, daß die Versuchsperson die vorbildgetreue Folge bis zu einem Tastverhältnis beibehält, das wesentlich geringer ist als das Verhältnis, das bei gleicher Tastfrequenz, aber abfallenden Vorgabefrequenzen eine endgültige Folge ermöglicht; das heißt, daß sie also bis zu einer höheren Frequenz zu folgen vermag (Tabelle 2).

Eine weitere Reihe von Versuchen mit drei Personen wurde durchgeführt, um bei ungeradzahligen Tastverhältnissen die geringste Abtasthäufigkeit zu ermitteln, die ausreicht, um einen einfachen Sinus sicher wiedergeben zu können. Dazu wurden Tastfrequenzen von 1, 2, 4, 8 und 10 Hz gewählt und die Frequenz der Vorgabe in kleinen Sprüngen von 10 - 0,25 Hz gesenkt. In diesen Versuchen zeigte sich, daß die einzelnen Personen unter gleichen Versuchsbedingungen und bei gleicher Tastfrequenz verschieden

hohe Vorgabefrequenzen mit einer endgültig sicheren Folge beantworten. Am höchsten liegen sie allgemein für die Vp. We., während die Vp. Sa. bei allen untersuchten Frequenzen die niedrigsten Grenzwerte zeigt (Tabelle 3). Außerdem ergab sich übereinstimmend für alle Versuchspersonen, daß das Grenzverhältnis von Tast- zu Vorgabefrequenz in dem Maße größer wird, in dem die Tastfrequenz zunimmt, also auch höhere Folgefrequenzen verlangt werden. Zum Beispiel folgt die Vp. Hu. bei einer Tastung (T) von 1 Hz bereits ab einer Vorgabe (V) von 0,5 Hz (Tastverhältnis 2 : 1) sicher, bei T = 2 Hz ab V = 0,65 Hz (Verhältnis 3,1 : 1), bei T = 4 Hz ab V = 1,25 Hz (Verhältnis 3,5 : 1), bei T = 8 Hz ab V = 2,25 Hz (Verhältnis 3,55 : 1) und bei T = 10 Hz erst ab V = 2,5 Hz (Verhältnis 4 : 1). Die anderen Versuchspersonen folgen z.T. bei geringeren oder höheren Vorgabefrequenzen, zeigen aber in gleichem Maße mit zunehmender Vorgabefrequenz eine notwendige Erhöhung der Tastverhältnisse (Tabelle 3).

Bei höheren Vorgabefrequenzen und nicht ausreichender Abtasthäufigkeit kann die Versuchsperson die Vorgabekurve nicht erkennen, und sie versucht, die Muster zu reproduzieren, die sie tatsächlich sieht, wie z.B. die immer wieder beobachtete Differenzfrequenz zwischen Tast- und Vorgabefrequenz. Besonders regelmäßig zeigte sich bei einer Vorgabefrequenz von $\frac{3}{4}$ der Tastfrequenz die ebenfalls sinusförmige

Differenzkurve mit einer Frequenz von $1/3$ der Vorgabe bzw. $1/4$ der Tastfrequenz (Abb. 1). Nur für Tastfrequenzen von 1 Hz und 10 Hz trat sie bei keiner der drei Versuchspersonen in Erscheinung und die Folgekurve verlief unregelmäßig sowie ohne eine Beziehung zur Vorgabe.

In den Versuchen mit zunehmenden Vorgabefrequenzen zeigte sich diese Differenzkurve nur einmal, und zwar bei einer Tastung von 8 Hz als Folge von 2 Hz für eine Vorgabe von 6 Hz bei der Vp. Hu. Bis die Versuchspersonen endlich bei einer ausreichenden Abtasthäufigkeit die Vorgabe erkennen und befolgen, bilden sie eine Vielzahl von selbständigen Frequenzen, die z.T. anscheinend keinerlei Zusammenhänge mit der Vorgabe oder der Tastung erkennen lassen, z.T. aber auch eine gewisse Übereinstimmung für verschiedene Frequenzen oder mehrere Versuchspersonen aufweisen. Es fällt auf, daß verschiedentlich selbständige, von der Vorgabe unabhängige Frequenzen im Verhältnis 1 : 4 zur Tastfrequenz gebildet werden, d.h., daß je vier aufeinanderfolgende Tastpunkte zu einer selbständigen sinusförmigen Kurve zusammengefaßt werden. So beantwortet die Vp. Sa. bei einer Tastfrequenz von 8 Hz Vorgabefrequenzen von 2,5 und 2,25 Hz mit einer Folge von 2 Hz (Abb. 2 und 3). Für ansteigende Vorgabefrequenzen erzielten sogar zwei Vpn. (Sa. und Hu.) bei einer Vorgabe von 3 Hz

und einer Tastung von 8 Hz eine Folge von 2 Hz. Verschiedentlich zeigen auch mehrere Versuchspersonen bei gleicher Tastung und Vorgabe, aber nur in undeutlichem Zusammenhang mit diesen, ein gleiches Verhältnis der Frequenzen von Vorgabe und erzielter Folge, wie z.B. die Vpn. Sa. und Hu. bei 10 Hz Tastfrequenz. Einer Vorgabe von 3 Hz wird 4 : 3, einer von 2,75 Hz 5 : 4 gefolgt. Das entspricht in beiden Fällen einer Folgefrequenz von ca. 2,2 Hz.

Vereinzelte halten die Versuchspersonen an der bei einem Tastverhältnis von 2 : 1 erstmals erzielten Folge fest, ohne eine weitere Frequenzänderung der Vorgabe zu beachten. Diese, allerdings nach einiger Zeit allmählich abnehmende, selbständige Frequenz geben sie erst dann auf, wenn sie sich auf eine endgültige und sichere Folge bei ausreichender Abtasthäufigkeit einstellen. Bei einer Tastfrequenz von 4 Hz zeigen alle drei Versuchspersonen bei einer Vorgabefrequenz von 2 Hz eine erste gute Folge, deren Frequenz sie auch nach weiterem Senken der Vorgabefrequenz bis zu 1,75 Hz annähernd beibehalten. Als erste folgt die Vp. We. ab 1,5 Hz endgültig, während die beiden anderen Versuchspersonen noch immer einen Sinus von 1,94 Hz bilden. Die Vp. Hu. folgt dann ab 1,25 Hz sicher; diese Frequenz beantwortet die Vp. Sa. nur noch mit 1,66 Hz; sie erkennt und befolgt die Vorgabe erst ab 1 Hz endgültig.

Im allgemeinen bemühen sich die Versuchspersonen jedoch, jede neue Vorgabefrequenz zu erfassen. Dabei bilden sie eine Vielzahl selbständiger Frequenzen, die oft kurz vor der Erreichung der endgültigen Folge nur noch geringfügig von der Frequenz der Vorgabe abweichen.

Besondere Beachtung verdient ein Versuch der Vp. Hu. mit konstanter Tastfrequenz von 4 Hz und abnehmenden Vorgabefrequenzen: Bei einer Vorgabe von 4 Hz bildet die Versuchsperson eine Folge von 4 Hz (Abb. 4 a); auch eine Vorgabe von 3 Hz befolgt sie vorbildgetreu mit ebenfalls 3 Hz (bei nur vier abgetasteten Punkten auf drei Schwingungen !) (Abb. 4 b), stellt sich dann aber nach einiger Zeit auf die bereits eingangs beschriebene Differenzkurve von 1 Hz um (Abb. 4 c). Eine endgültig sichere, auch mit geschlossenen Augen aus dem Gedächtnis reproduzierte Folge wird aber erst ab 1 Hz Vorgabe erreicht. Ein später unter gleichen Bedingungen durchgeführter Wiederholungsversuch zeigte diese Besonderheiten nicht mehr und die Versuchsperson erreichte nur die für diese Versuchsreihe allgemein gefundenen Ergebnisse.

Auch in anderen Versuchen wurde beobachtet, daß die Versuchspersonen - unabhängig von der Vorgabefrequenz - jeden einzelnen Tastpunkt mit einer vollen Schwingung beantworten, wie z.B. die Vp. Sa. bei einer Tastfrequenz von 2 Hz und einer Vorgabe von 8 Hz, oder die Vp. Hu. bei der gleichen Tastfrequenz,

aber allmählich zunehmenden Vorgabefrequenzen bei einer Vorgabe von 1,5 Hz. In beiden Fällen wird gleichmäßig mit einer der Tastung entsprechenden Frequenz von 2 Hz gefolgt.

Die Vpn. Hu. und We. erzielen in allen Versuchen, auch bei einer Tastfrequenz von 8 Hz (die Vp. Hu. sogar bei 10 Hz) eine erste gute Folge bei einem Tastverhältnis von 2 : 1. Diese zeigt bei einer geringen Unganzzahligkeit von Vorgabe und Tastung häufig das Phänomen einer Schwebung, d.h., die Amplituden nehmen symmetrisch zur Nulllinie allmählich bis zu einem Minimum ab. Danach steigen sie wieder bis zu der anfänglichen Größe an, um dann erneut kleiner zu werden. Dabei zeigen sich auch mitunter geringe Abweichungen der Frequenz der Folge von der der Vorgabe. Auch bei dieser Erscheinung, die sich fortlaufend wiederholt, bis die Frequenz der Vorgabe geändert wird, gibt die Versuchsperson anscheinend nur ihre tatsächliche Beobachtung wieder (Abb. 5).

Bei Tastfrequenzen von 4 und 8 Hz und abnehmenden Vorgabefrequenzen erzielt die Vp. Sa. bei einem Tastverhältnis von 2 : 1 nicht eine erste Folge, sondern beantwortet diese Frequenz mit einer Schwingung von nur halber Frequenz der Vorgabe, faßt also wieder je vier Tastpunkte zu einer neuen, selbständigen Kurve zusammen (Abb. 6).

Ergänzungsversuche zur Kontrolle der bei 8 Hz Tastfrequenz gefundenen Werte mit zwei weiteren, in den

Versuchsbedingungen völlig unerfahrenen Personen zeigen diese Eigenart ebenfalls. In seltenen Fällen tritt auch bei diesen Folgekurven von nur halber Frequenz der Vorgabe eine leichte Schwebung in Erscheinung.

Bei den neu hinzugekommenen Versuchspersonen fällt auf, daß sie eine erheblich höhere Abtasthäufigkeit als die anderen drei Personen benötigen, um eine endgültig sichere Folge zu erzielen; bei beiden liegt die Grenze bei 1,3 Hz, obwohl die Tastfrequenz von 8 Hz nach den bisher gewonnenen Erkenntnissen eine höher gelegene Frequenz der sicheren Befolgung der Vorgabe erwarten läßt.

Alle Folgekurven unter einer Frequenz von 0,5 Hz zeigen bis zu Tastfrequenzen von 1 Hz deutliche Korrektursprünge, und unter 0,3 Hz werden alle vorgegebenen Sinusschwingungen zwar frequenzgetreu, aber mehr dreieck- als sinusförmig und ebenfalls mit Korrektursprüngen befolgt.

2. Änderung der Tastfrequenz bei konstantem, geübtem sinusförmigem Vorgabemuster.

Ein sinusförmiges Muster einer bestimmten Frequenz wurde ungetastet ca. 1-2 Minuten lang eingeübt und zum Schluß registriert. Dann wurde das gleiche Muster mit einer hohen Frequenz abgetastet angeboten und

die Tastung allmählich in kleinen Sprüngen so weit gesenkt, bis die Folgekurve deutliche Abweichungen von der Vorgabekurve aufwies. Als Vorgabemuster dienten Sinusschwingungen von 0,5, 1,0 und 2,0 Hz, die Tastfrequenz wurde von 10 bzw. 16 Hz bis zu 0,2 Hz gesenkt. Es standen drei Versuchspersonen zur Verfügung (Sa., Hu. und Ko.), von denen eine - die Vp. Ko. - noch keine Versuchserfahrungen hatte.

Diese Serie von Versuchen ergab, daß bei einem geübten und damit auch gelernten sinusförmigen Vorgabemuster der untersuchten Frequenzen ca. 2-3 Tastungen pro Schwingung noch völlig ausreichen, um eine vorbildgetreue Folge zu erzielen. Allerdings erwies sich der Versuch der Vp. Ko. mit einer Vorgabefrequenz von 2 Hz als unbrauchbar, da die Versuchsperson - selbst nach längerer Übung - einem einfachen Sinus mit einer Frequenz von 2 Hz nicht zu folgen vermochte. Ein Wiederholungsversuch und ein Versuch mit ungetastet angebotenen Sinus von 2 Hz verliefen ebenso negativ.

Während allgemein unter einem Tast - Vorgabeverhältnis von 2 : 1 die Folge deutlich von der Vorgabe abzuweichen beginnt, zeigt die Vp. Hu. verschiedentlich eine Reproduktion der Vorgabe bis zu einer so niedrigen Tastfrequenz, daß auf je zwei, manchmal auch drei Vorgabeschwingungen nur noch ein Tastpunkt entfällt. Zum Beispiel wird die Vorgabe von 1 Hz bis zu einer Tastfrequenz von 0,5 Hz (Tastver-

hältnis 1 : 2 !), die Vorgabe von 0,5 Hz sogar bis zu einer Tastfrequenz von 0,166 Hz (Tastverhältnis 1 : 3 !) befolgt (Abb. 7). Ändert man dann allerdings zur Irritation der Versuchsperson die Vorgabefrequenz für eine kurze Zeit und stellt danach wieder auf den ursprünglichen Wert ein, so entfällt die sichere Befolgung der Vorgabe und stellt sich, auch nach einer längeren Zeit der Suche, nicht wieder ein.

Wie in den Versuchen mit fester Tastfrequenz und variiertter Frequenz der Vorgabe zeigt sich auch in denen mit konstanter, fest eingeübter Vorgabe und veränderlicher Tastfrequenz das Phänomen der Schwelung. Sie tritt bei der Vp. Sa. regelmäßig in allen drei untersuchten Frequenzen (0,5, 1,0 und 2,0 Hz Vorgabe) bei einem Tast - Vorgabeverhältnis von ca. 2 : 1 in einer frequenzgetreuen Folge auf. In einem anderen Versuch der Vp. Sa. konnte auch die Nachbildung der Differenz zwischen Vorgabe und Tastfrequenz beobachtet werden: Bei einer Vorgabe von 1,0 Hz und einer Tastung von 1,5 Hz zeigt sich diese als Sinusschwingung mit einer Frequenz von 0,5 Hz.

Bei einer Vorgabe von 0,5 Hz und einer Tastung von 1 Hz entfallen auf jede Vorgabeschwingung zwei abgetastete Punkte. Während die beiden anderen Versuchspersonen diese wieder in Form einer Schwingung nachbilden, also eine kontinuierliche Bewegung ausführen,

stellt sich die Vp. Ko. nach Ablauf einer konstanten Zeitspanne von 125 msec auf jeden dieser Punkte ein und behält ihn solange bei, bis sie durch den nächsten Tastpunkt ein neues Zielobjekt erhält. Auf diese Weise entsteht eine rechteckförmige Folgekurve von gleicher Frequenz der sinusförmigen Vorgabe mit einem Phasennachhalt von 45° , d.h., die Bewegung erfolgt diskontinuierlich. Bei weiterer Senkung der Tastfrequenz unter ein Verhältnis von 2:1 zur Vorgabe treten die entsprechenden Differenzkurven ebenfalls diskontinuierlich und mit dem gleichen Phasennachhalt von 45° auf.

3. Wechsel von getastetem sinusförmigem und dreieckförmigem Vorgabemuster.

In diesen Versuchen sollte festgestellt werden, ob getastet angebotene Muster, die eine leichte Ähnlichkeit zueinander aufweisen, als verschiedenartig erkannt und befolgt werden, und welche Abtasthäufigkeit zur Erkennung der einzelnen Frequenzanteile einer aus Sinusschwingungen zusammengesetzten Kurve, als die auch das Dreieck anzusehen ist (Näheres in der Diskussion), notwendig ist.

In jedem Versuch wurden abwechselnd ein gleichseitiges Dreieck und ein Sinus von je 0,5 Hz und gleicher Amplitudengröße vorgegeben, ohne daß die Ver-

suchsperson wußte, daß ihr verschiedenartige Muster angeboten werden. Auch der Wechsel zwischen beiden Mustern wurde so vorgenommen, daß er für die Versuchsperson nicht wahrnehmbar war. Nur die Vp. We. wußte von der Verschiedenartigkeit der Muster, ohne aber deren Wechsel erkennen zu können. Nach anfänglicher Registrierung der Folgekurven beider Vorgabemuster übte die Versuchsperson während des Versuches ca. zwei Minuten lang das Dreieck ohne Registrierung, danach wurde die Folgekurve des geübten Dreiecks und der abschließende mehrmalige Wechsel zwischen Dreieck und Sinus aufgezeichnet. Die eingestellte Tastfrequenz wurde während des Versuches konstant gehalten.

Es wurde bei gleichbleibender Vorgabefrequenz von 0,5 Hz eine für jeden Versuch konstante Tastfrequenz von 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 5,0, 7,5 oder 10 Hz gewählt; das entspricht Tastverhältnissen von 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1, 6 : 1, 10 : 1, 15 : 1 und 20 : 1.

Die Versuche mit 1, 2, 3 und 5 Hz Tastfrequenz und die abschließenden Kontrollversuche mit kontinuierlich vorgegebenen Sinus- und Dreiecksmustern führten drei Personen (Sa., Hu. und We.), jene mit 1,5, 7,5 und 10 Hz Tastung nur zwei Personen (Sa. und We.) aus.

Die Ergebnisse dieser Versuche wurden zunächst optisch auf die Form der wiedergegebenen Muster untersucht, danach die charakteristischsten Stellen eines jeden Versuches ausgewählt und auf elektronischem Rechenwege

die in diesen Kurvenabschnitten enthaltenen Frequenzen ermittelt. (Das Prinzip der mathematischen Auswertung wird in der Diskussion besprochen.)

Bei der Beurteilung der Qualität der Wiedergabe wurden außer den rechnerisch gefundenen Werten auch die Ergebnisse der optischen Sichtung berücksichtigt. Dabei zeigte sich, daß die Unterscheidungsfähigkeit der Versuchspersonen zwischen den beiden Mustern recht unterschiedlich ist; am ausgeprägtesten zeigte sie sich bei der Vp. We. Bei einem Tastverhältnis von 2 : 1 (Tastung : Vorgabe) befolgt sie beide Muster vorwiegend sinusförmig und nur sehr selten mit einer geringfügigen Ähnlichkeit zum Dreieck. Nur sehr ungenau wird die Frequenz der Vorgabe bei einem Tastverhältnis von 3 : 1 eingehalten, und die leicht dreieckförmig befolgte Dreiecksvorgabe wird nach Übung, genau wie die vorgegebenen Sinusschwingungen, sinusförmig beantwortet. Nur bei einem Tastverhältnis von 4 : 1 konnte beobachtet werden, daß die anfänglich recht gute Unterscheidungsfähigkeit zwischen Sinus und Dreieck durch Übung noch verbessert wird; bei mehreren anderen Tastverhältnissen zeigte sich nach Übung des Dreiecksmusters jedoch eine rapide Verschlechterung der Ergebnisse. Die deutlichsten Beispiele dafür finden wir bei einem Tastverhältnis von 6 : 1 und 10 : 1; hier werden die beiden Muster vor der Übung des Dreiecks von allen untersuchten Tastverhältnissen am besten wiedergegeben

(Abb. 8), nach der Übung werden jedoch das Dreieck nur sehr ungenau und der Sinus mit leichter Dreieckähnlichkeit nachgebildet. Bei einem Tastverhältnis von 15 : 1 werden anfangs beide Vorgabemuster leicht dreieckförmig befolgt. Nach der Übung zeigt die Wiedergabe des Dreiecks teils sehr gute dreieckförmige, teils aber auch rein sinusförmige Gestalt und die Beantwortung der Sinusschwingungen nimmt mehr dreieckige Form an. Auch bei einem Tastverhältnis von 20 : 1 wird die Vorgabe falsch beurteilt und der Sinus als Dreieck - und umgekehrt - befolgt. Erst nach der Übung wird der Sinus richtig, das Dreieck teils als gutes Dreieck, teils aber auch wieder als reiner Sinus wiedergegeben.

Anschließend durchgeführte Versuche mit ungetastet angebotener Vorgabe zeigen, daß schon vor der Übung eine recht gute Unterscheidungsfähigkeit zwischen kontinuierlichen Dreieck- und Sinusschwingungen besteht, die durch Üben des Dreieckmusters jedoch noch verbessert werden kann.

Auch die Vp. Sa. hält bei einem Tastverhältnis von 3 : 1 die Frequenz der sinusförmigen Vorgabe nicht ein, befolgt jedoch das dreieckförmige Muster frequenzgetreu, allerdings als Sinusschwingung mit einer kleinen zusätzlichen Oberwelle. Bis zu einem Tastverhältnis von 6 : 1 treten immer wieder Korrektursprünge und Zacken auf, und bei einer Abtasthäufigkeit von 6 : 1 werden - auch nach Übung des

Dreiecks - die Sinus- und Dreieckskurven als verzogene, steil aufsteigende und dann nur langsam abfallende sägezahnartige Kurven wiedergegeben. Erstmals wird das Dreieck bei einem Tastverhältnis von 15:1 annähernd richtig nachgebildet, nachdem es vorher geübt wurde; aber erst mit einer Häufigkeit von 20:1 abgetastet, wird das Dreieck auch vor der Übung erkannt und richtig befolgt. Auch hier verbessert Übung das Ergebnis.

Wie die Vp. We. vermag auch die Vp. Sa. bei ungetasteter Vorgabe die beiden Muster recht gut, nach Übung des Dreiecks sogar fast sicher voneinander zu unterscheiden.

In ihren Versuchen mit Tastverhältnissen von 2:1, 4:1 und 10:1 befolgt die Vp. Hu. - auch nachdem das Dreieck geübt wurde - beide Vorgabemuster regelmäßig sinusförmig. Nur bei einem Tastverhältnis von 6:1 bildet sie eine sinusförmige Vorgabe dreieckförmig und ein Dreieck als Sinus nach und stellt sich auch nach eingehender Übung nicht auf die richtigen Muster ein.

4. Tastung von Mischungen harmonischer Schwingungen.

a) Periodische Mischung harmonischer Schwingungen

Die periodischen Mischungen wurden aus drei Sinusschwingungen von gleicher Amplitudengröße zusammen-

gesetzt. Die Frequenzen dieser Schwingungen verhielten sich zueinander wie die Verhältnisse 1 : 2 : 3. Durch Verschiebung der Anfangsphasen ergaben sich verschiedenartige Muster, deren Nachbildung subjektiv mehr oder weniger kompliziert erschien. Für die "einfache" Mischung wurden als Phasenbeziehungen der beiden Oberwellen 90° und 180° , für die "komplizierte" Mischung 270° und 270° gewählt. Beide Muster - sie werden im weiteren Verlauf der Abhandlung als "einfaches" oder "kompliziertes" periodisches Muster bezeichnet - wurden mit einer Grundwellenfrequenz von 0,5 Hz und 1,0 Hz und mit Tastfrequenzen von 1 - 12 Hz bzw. 1 - 16 Hz dargeboten. Nachdem bei größter Abtasthäufigkeit am Ende des Versuches eine bestmögliche Folge erreicht war, wurde die Vorgabe abgeschaltet und die Versuchsperson mußte das Kurvenbild mit geschlossenen Augen aus dem Gedächtnis reproduzieren. Abschließend wurde das gleiche Muster noch einmal mit höchster Frequenz getastet angeboten. Diese Versuche wurden von drei Personen (Sa., Ko. und We.) ohne vorherige Übung ausgeführt.

Alle Folgekurven wurden optisch auf die Anzahl der nachgebildeten Schwingungen und die Qualität der reproduzierten Muster untersucht. Die Versuche der Vp. We. mit dem "einfachen" periodischen Muster wurden außerdem auch auf dem elektronischen Rechenwege ausgewertet und die in ihnen wiedergegebenen Fre-

quenzen nach der Fourier-Analyse bestimmt (Tabelle 4a und 4b).

Für das "komplizierte" periodische und das später beschriebene nichtperiodische Muster erwies sich diese Methode als unbrauchbar, und wir mußten uns bei dem "komplizierten" periodischen Muster auf eine rein optische Auswertung beschränken, da eine Darstellung der in der Folgekurve enthaltenen Frequenzen mittels eines Leistungsspektrums aus rechenzeitlichen Gründen undurchführbar war.

Die im Folgenden genannten Tastverhältnisse (Frequenz der Tastung zur Frequenz der Vorgabe) beziehen sich nur auf die Grundwelle. Entsprechend den Verhältniszahlen der in der Vorgabe enthaltenen Schwingungen betragen sie für die erste Oberwelle die Hälfte, für die zweite Oberwelle ein Drittel der angegebenen Werte.

Bei einer Grundfrequenz von 0,5 Hz bildet die Vp. We. in Versuchen mit "einfachem" periodischem Muster ab einem Tastverhältnis von 3 : 1 die Grundwelle, ab 4 : 1 auch die erste Oberwelle erkennbar nach. Dann folgt bis zu einem Verhältnis von 8 : 1 ein Bereich, in dem die Grundwelle mit einer variierenden Anzahl kleiner Oberwellen auftritt. Ab 8 : 1 zeigt sich ein zwar festes, aber nicht vorgebetreues Kurvenbild mit einer Grundwelle, einer zu kleinen ersten, einer größenmäßig richtigen zweiten und einer gleichgroßen zusätzlichen dritten

Oberwelle. Erst ab einem Tastverhältnis von 12 : 1 wird das Muster richtig erkannt, und die errechneten Amplituden- und Phasenbeziehungen stimmen mit denen der Vorgabe annähernd überein. Diese gute Folge wird auch bis zu einem Verhältnis von 24 : 1 beibehalten; die mit geschlossenen Augen aus dem Gedächtnis nachgebildete Kurve zeigt jedoch durch eine Vergrößerung der kleinen Schwankungen des Musters im Sinne einer Nivellierung eine starke Verschiebung im Amplituden- und Phasenverhalten. Die abschließend noch einmal in einem Verhältnis von 24 : 1 getastet angebotene Vorgabe wird wieder einwandfrei befolgt.

Bei der gleichen Grundwellenfrequenz von 0,5 Hz folgt die Vp. Ko. bei einem Tastverhältnis von 2 : 1 mit einer rechteckförmigen Kurve, deren Frequenz der der Grundwelle entspricht. Bis zu einem Verhältnis von 8 : 1 zeigen die Folgekurven der beiden Vpn. Sa. und Ko. eine sich ständig verändernde Anzahl kleiner unregelmäßiger Schwingungen und nur vereinzelt eine einigermaßen gut ausgeprägte Grundwelle. Beide Versuchspersonen bilden bei 8 : 1 die Grundwelle mit der ersten und der - bei der Vp. Sa. allerdings etwas zu kleinen - zweiten Oberwelle recht gut nach. Während die Vp. Ko. dann ab 12 : 1 schon vorwiegend vorbildgetreu folgt, läßt die Qualität der Nachbildung bei der Vp. Sa. wieder nach und zeigt bis zu einem Tastverhältnis von 18 : 1 nur

eine undeutliche Grundwelle mit einer kleinen Oberwelle. Erst ab einem Tastverhältnis von $24:1$ wird das Vorgabemuster auch von der Vp. Sa. richtig wiedergegeben (Abb. 9a). Die aus dem Gedächtnis reproduzierten Kurven beider Versuchspersonen weichen kaum von der Vorgabe ab, nur die Vp. Sa. bildet zeitweise beide Oberwellen etwas zu groß nach und deutet vereinzelt eine zusätzliche dritte, in der Vorgabe nicht enthaltene, Oberwelle an. Der erneut in einem Verhältnis von $24:1$ getastet angebotenen Vorgabe wird von beiden Versuchspersonen einwandfrei gefolgt.

Bei einer Grundwellenfrequenz von $1,0$ Hz zeigt sich bei "einfachem" periodischem Muster in der Folgekurve der Vp. We. schon bei einem Tastverhältnis von $2:1$ die Grundwelle, die dann bis zu einem Verhältnis von $6:1$ meist nicht frequenzgetreu und mit einer wechselnden Anzahl von eins bis fünf kleinen unregelmäßigen Oberwellen auftritt. Bis zu einer Abtasthäufigkeit von $10:1$ wird eine zwar frequenzgetreue, aber in der Amplitude viel zu kleine Grundwelle mit drei bis vier kleinen Oberwellen gebildet. Erst bei einem Tastverhältnis von $12:1$ wird die Vorgabe erkannt und mit einer zwar immer noch zu flachen Grundwelle, aber größtmäßig fast richtigen Oberwellen nachgebildet. Das gleiche Merkmal weist auch das mit geschlossenen Augen aus dem Gedächtnis reproduzierte Kurvenbild auf.

Die Folge der beiden anderen Versuchspersonen zeigt bis zu einem Tastverhältnis von 4 : 1 eine Vielzahl unregelmäßiger Schwingungen und nur sehr vereinzelt eine Andeutung der Grundwelle, die bei der Vp. Sa. ab 4 : 1, bei der Vp. Ko. erst ab 5 : 1 deutlicher in Erscheinung tritt. Während die Vp. Sa. ab 4,5 : 1 beginnt, die erste und ab 5,5 : 1 auch die zweite Oberwelle nachzubilden, folgt die Vp. Ko. bis zu einem Tastverhältnis von 8 : 1 mit einem flachen, meist etwas verzogenen Sinus mit der Grundwellenfrequenz von 1,0 Hz. Die bei einer Abtasthäufigkeit von 6 : 1 bereits recht gut ausgeprägte Folgekurve der Vp. Sa. verschlechtert sich mit zunehmender Tastung wieder und zeigt bei 7 : 1 und 8 : 1 nur noch eine, bei 9 : 1 und 10 : 1 jedoch drei, auch in der Form völlig von der Vorgabe abweichende Oberwellen. Erst ab einem Tastverhältnis von 12 : 1 erreicht die Vp. Sa. (Abb. 9 b), ab 16 : 1 auch die Vp. Ko. eine sichere Nachbildung der Vorgabekurve. Beide Versuchspersonen können das Muster aus dem Gedächtnis nur sehr ungenau reproduzieren, aber die abschließend noch einmal mit 16 : 1 getastet angebotene Vorgabe wird von allen Versuchspersonen erheblich besser als vorher bei der gleichen Tastfrequenz wiedergegeben.

Die Nachbildungen des "komplizierten" periodischen Musters mit einer Grundwellengeschwindigkeit von

0,5 Hz zeigen bei allen drei Versuchspersonen bis zu einem Tastverhältnis von 8 : 1 eine nur teilweise richtig ausgeprägte Grundwelle mit mehreren, meist zwei bis drei, der Vorgabe nicht entsprechenden Oberwellen. Bei einer Tastung von 10 : 1 entsteht eine gut nachgebildete Grundwelle mit einer fast gleich großen ersten Oberwelle. Eine weitere Erhöhung der Tastfrequenz ermöglicht allen drei Versuchspersonen eine recht gute Nachbildung der Grundwelle und der ersten Oberwelle. Ab einem Tastverhältnis von 16 : 1 wird von den Vpn. Ko. und We., ab 24 : 1 auch von der Vp. Sa. eine, von der Vorgabe allerdings erheblich abweichende, zweite Oberschwingung gebildet. Eine wirklich vorbildgetreue Reproduktion der vorgegebenen "komplizierten" Mischung harmonischer Schwingungen gelingt nur der Vp. Ko. gelegentlich bei einem Tastverhältnis von 28 : 1 und 32 : 1 (Abb. 10 a); die beiden anderen Versuchspersonen vermögen auch bis zur höchsten untersuchten Abtasthäufigkeit von 32 : 1 nicht zu folgen. Aus dem Gedächtnis bilden alle drei Versuchspersonen nur die Grund- und die erste Oberwelle richtig nach; aber die direkt anschließend daran erneut mit einem Verhältnis von 32 : 1 getastet angebotene Vorgabe wird von den Vpn. Ko. und We. und ein ungetastet, also kontinuierlich, vorgegebenes Muster wird auch von der Vp. Sa. recht gut wiedergegeben.

Ein "kompliziertes" periodisches Muster mit einer

Grundwellengeschwindigkeit von 1,0 Hz befolgen die Vp. We. bis zu einer Abtasthäufigkeit von 4 : 1, die Vpn. Sa. und Ko. bis zu 5 : 1 mit einer mehr oder weniger guten, von der Vp. Ko. zu flach gebildeten Grundwelle. Daran schließt sich ein Bereich mit nicht frequenzgetreuer Wiedergabe einer Grundwelle und einer wechselnden Anzahl von eins bis vier, von der Vorgabe völlig abweichenden, Oberwellen an, und erst ab 8 : 1 befolgt die Vp. Sa., ab 9 : 1 die Vp. We. die Grund- und erste Oberwelle frequenzgetreu. Ab einem Tastverhältnis von 10 : 1 zeigt sich bei der Vp. We., ab 12 : 1 bei der Vp. Sa. auch eine zweite, aber nicht vorbildgetreue Oberwelle (Abb. 10b). Die Kurvenbilder der Vp. Ko. haben in den verschiedenen Tastbereichen ein ähnliches Aussehen, weichen aber von der Frequenz der Vorgabe erheblich ab. Mit geschlossenen Augen bildet die Vp. Sa. aus dem Gedächtnis die Grundwelle mit einer sehr großen ersten, die Vp. We. mit zwei kleinen, nicht vorgabegetreuen Oberwellen frequenzgetreu nach; die Folgekurve der Vp. Ko. mit einer Grund- und zwei, ebenfalls denen der Vorgabe nicht entsprechenden, Oberschwingungen zeigt auch hier ein Nichteinhalten der Vorgabefrequenz. Das anschließend noch einmal mit einer Häufigkeit von 16 : 1 getastet und zum Abschluß sogar kontinuierlich angebotene Muster wird von allen drei Versuchspersonen unverändert schlecht befolgt, und nur bei der Vp. Ko. tritt insofern eine Verbesserung ein, als wenigstens die Grundwelle frequenzgetreu nachgebildet wird.

b) Nichtperiodische Mischung harmonischer Schwingungen.

Die Frequenzverhältnisse von fünf amplitudengleichen Sinusschwingungen wurden so gewählt ($1 : 2,20 : 3,42 : 4,74 : 6,20$), daß sich das entstehende Kurvenmuster erst nach ca. vier Stunden wiederholt. Damit waren praktisch nichtperiodische Bedingungen erreicht und eine Vorhersagbarkeit des Musters ausgeschlossen worden. Es wurden Geschwindigkeiten der niedrigsten Frequenz des Musters von 0,25, 0,5 und 1,0 Hz mit Tastfrequenzen von 1 bis 16 Hz angeboten. Die Versuche wurden nur von der Vp. We. und ohne vorherige Übung ausgeführt.

Die Ergebnisse dieser Versuche wurden auf elektronischem Rechenwege ausgewertet und die in den Vorgabe- und Folgekurven enthaltenen Frequenzen mittels eines Leistungsspektrums dargestellt. Dabei zeigte sich, daß nur Frequenzanteile bis gut zur Hälfte der Tastfrequenz reproduziert werden, auch wenn im Vorgabemuster noch höhere Frequenzen enthalten sind. Mit zunehmender Abtasthäufigkeit werden erstaunlicherweise anscheinend die höheren Frequenzanteile bis zu einem solchen Maße bevorzugt wiedergegeben, daß unter Umständen nur die höchste Frequenz nachgebildet wird, während von den niedrigeren keine nennenswerten Amplituden wiederzufinden sind. Auch die im Folgemuster deutlich reproduzierten Schwingungen erreichen nur bis zu maximal 70 % der Amplitudenwerte der Vorgabe. Dabei treten, wie Vossius und Hummel (10) auch für ungetastet dargebotene

nichtperiodische Muster beschrieben haben, nur stärker ausgeprägt, Frequenzanteile auf, die in der Vorgabe nicht enthalten sind. Noch deutlicher zeigt sich diese Unregelmäßigkeit bei zunehmender Geschwindigkeit des Musters, so daß in unseren Versuchen mit einer Frequenz der langsamsten Schwingung von 0,5 Hz keine der Frequenzen des Vorgabemusters aus dem Spektrum in abhebender Weise reproduziert wurde. Die gleichen Beobachtungen finden sich ebenso bei einer weiteren Steigerung der Frequenz des Musters bis zu einer Geschwindigkeit der langsamsten Schwingung von 1 Hz. Daß aber dieses völlige Verschwinden der im Spektrum der Vorgabe enthaltenen Frequenzen in den Folgemustern nicht auf einer Gesetzmäßigkeit beruht, zeigt sich darin, daß sich in zwei Fällen bei dieser höchsten Mustergeschwindigkeit und bei sehr unterschiedlichen Tastverhältnissen die zweitniedrigste Frequenz mit einer deutlichen Amplitude von der Vielzahl der der Vorgabe nicht entsprechenden Schwingungen abhebt (Abb. 11 - 14).

Diskussion der Ergebnisse

Um eine einfache Sinusschwingung von unbekannter Frequenz eindeutig wiedergeben zu können, muß diese nach dem Abtasttheorem von Shanon (4) mit mindestens dem Doppelten ihrer eigenen Frequenz abgetastet werden. Versuche von Westheimer (12) über die Regelbewegung des Auges mit getastet angebotenen Mustern und Versuche von Vossius (8) mit stroposkopischer Kontrolle der Regelbewegung der Hand haben ergeben, daß auch getastete Muster mit einer durchaus sinnvollen kontinuierlichen Bewegung befolgt werden können. Die daraus resultierende Fragestellung, nach welchen Gesetzmäßigkeiten die höheren Zentren des Gehirns diese getasteten Muster auswerten, und ob sie dabei mit der im Abtasttheorem geforderten Minimalinformation auskommen, sollte im Rahmen dieser Arbeit geklärt werden.

Im Verlaufe der Untersuchungen zeigte sich, daß die Minimalinformation von zwei Tastpunkten pro Schwingung generell nicht ausreicht, um eine unbekannte Sinusschwingung eindeutig reproduzieren zu können. In fast allen Fällen wird zwar bei diesem Tastverhältnis von 2 : 1 eine gute Folge erzielt, die sich aber bei weiterer Steigerung der Tastfrequenz in unganzzahligen Verhältnissen zur Vorgabe sofort wieder verliert und erst nach Erreichung einer bestimmten Abtasthäufigkeit wieder einstellt. Dieses Grenztastverhältnis, das zur eindeutigen Reproduktion eines sinusförmigen Musters aus-

reicht, stellt allerdings keinen konstanten Wert dar, sondern steht in Abhängigkeit zur Frequenz der Vorgabe. Zunehmende Frequenzen der nachzubildenden Sinusschwingungen fordern zwangsläufig auch eine Erhöhung der Abtasthäufigkeit. Diese liegt bei niedrigen Vorgabefrequenzen bis zu etwa 1 Hz bei einem Verhältnis von ca. 2 : 1, steigert sich aber mit zunehmender Frequenz der Vorgabe bis zu einem Verhältnis von 4 : 1, in manchen Fällen sogar bis 8 : 1. Darüberhinaus scheinen auch die persönlichen Fähigkeiten, ein getastetes Muster nachzubilden, individuell verschieden zu sein, denn es zeigte sich, daß z.B. die Vp. Sa. generell für alle untersuchten Frequenzen ein wesentlich höheres Abtastverhältnis zur Erfassung des Musters benötigte, als vergleichsweise die Vp. We.

Das Grenzverhältnis der Tastung liegt, wenn man eine langsame Vorgabefrequenz, der die Versuchsperson gut zu folgen vermag, allmählich solange steigert, bis eine Folge nicht mehr möglich ist, etwas niedriger, als wenn man bei gleicher Tastung eine sehr hohe Vorgabefrequenz allmählich bis zur Erreichung einer eindeutigen Folge senkt. Aber auch in diesem Falle besteht die Notwendigkeit einer Erhöhung der Tastverhältnisse bei zunehmender Frequenz des geforderten Musters.

Einer bedingungslosen Steigerung der Vorgabefrequenz ist sowieso eine natürliche Grenze gesetzt, die Altrock (1) mit ca. 3 Hz angibt. Darüberliegenden Frequenzen vermag die menschliche Hand nicht mehr mit Sicherheit zu folgen. Diese Frequenzgrenze hat sich auch für die

Regelbewegung der Hand mit getasteten sinusförmigen Vorgabemustern bestätigt.

Bei unzureichender Abtasthäufigkeit, d.h., wenn das sinusförmige Muster mit weniger als dem Doppelten seiner eigenen Frequenz getastet wird, finden sich häufig Differenzbildungen zwischen Tastfrequenz und Vorgabe in den Folgemustern. So läßt sich wohl auch das bei einem Tastverhältnis von ca. 2 : 1 immer wieder beobachtete Phänomen der Schwebung bei einer nur geringen Unganzzahligkeit von Tastung und Vorgabe damit erklären, daß die Versuchsperson nur das tatsächliche, durch die Frequenzverschiebung veränderte, optische Bild der Vorgabe reproduziert. Auch in der bei einem Verhältnis der Tastung zur Vorgabe von 4 : 3 fast regelmäßig auftretenden Differenzkurve mit einer Frequenz von $1/3$ der Vorgabe gibt die Versuchsperson nur ihren tatsächlichen Eindruck des Gesehenen wieder. In diesem Falle bilden je vier aufeinanderfolgende Tastpunkte eine neue Kurve, die die Versuchsperson als eine zusammenhängende Sinusschwingung mit einer Frequenz von $1/3$ der Vorgabefrequenz erkennt.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse, wenn z.B. bei einer Tastung von 8 Hz und einer Vorgabe von 3 Hz eine Folge von 2 Hz erzielt wird. Mit dieser Frequenz bildet die Versuchsperson - wiederum je vier Tastpunkte zu einer Schwingung zusammenfassend - scheinbar unabhängig von der Vorgabe einfach ein Muster, das ihr am wahrscheinlichsten erscheint. Überhaupt wird dieses

Verhältnis von 4 : 1 anderen Tastverhältnissen in auffallender Weise vorgezogen, so z.B. auch in einem Versuch der Vp. Sa., in dem die Versuchsperson bei einem Tastverhältnis von 2 : 1 einen Sinus von nur halber Frequenz der Vorgabe bildet, also wiederum aus je vier Tastpunkten eine selbständige, nicht vorgabegetreue Kurve zusammenstellt.

Diese Tatsachen lassen darauf schließen, daß die höheren Hirnzentren nicht im Sinne eines einfachen passiven Filters arbeiten, das die Informationen lediglich überträgt, sondern daß sie das Muster aufnehmen, verarbeiten und aktiv nachbilden. Bei unzureichender Abtasthäufigkeit weichen bei diesem Verarbeitungsmodus diese Nachbildungen verständlicherweise von den dargebotenen Vorgabemustern ab. Für die Vorstellung einer aktiven Musternachbildung spricht auch, daß sich vielfach die bei unzureichender Abtasthäufigkeit auftretenden selbständigen Frequenzbildungen in dem Maße der Vorgabefrequenz nähern, in dem auch die Tastung sich der zur eindeutigen Befolgung notwendigen Frequenzgrenze nähert. Oft weicht die nachgebildete Kurve dann kurz vor Erreichung der Tastgrenze, und damit auch der eindeutigen Folge, nur noch minimal von der geforderten Frequenz ab. In dem Bestreben, auch bei unzureichender Tastung das Vorgabemuster zu reproduzieren, orientieren sich die höheren Zentren an bestimmten Hilfsinformationen und bilden aus ihnen Muster, die sie anscheinend für die tatsächliche Vorgabe halten. So läßt sich beispielsweise die Bildung selbständiger

Sinusschwingungen aus je vier Tastpunkten erklären, oder das verschiedentlich beobachtete Phänomen der Triggerung auf jeden Impuls, d.h., daß jeder einzelne Tastpunkt - ungeachtet der Vorgabe - mit einer vollen Schwingung beantwortet wird. Stimmen dabei die Frequenzen der Tastung und der Vorgabe zufällig überein, wie z.B. bei dem Versuch der Vp. Hu. mit einer Tastung und einer Vorgabe von je 4 Hz, so entsteht der Eindruck, als erziele die Versuchsperson tatsächlich schon bei einem Tastverhältnis von 1 : 1 eine sichere Folge, obwohl es sich dabei nur um eine einfache Triggerung der Tastfrequenz handelt.

Daß auch getastete Muster durchaus gelernt werden können, geht daraus hervor, daß bisweilen die bei einem Tastverhältnis von 2 : 1 erstmals erzielte Folgefrequenz beibehalten wird, obwohl die Frequenz der Vorgabe weiter gesenkt wurde. Erst nach Erreichung der zur eindeutigen Erfassung der Vorgabefrequenz ausreichenden Abtasthäufigkeit stellt sich die Versuchsperson dann auf das tatsächliche Vorgabemuster ein.

Die Fähigkeit, durch Übung einen Sinus zu lernen, kann sogar soweit gehen, daß z.B. die Vp. Hu. einen geübten Sinus von 0,5 Hz auch dann noch nachbildet, wenn er nur noch mit einem Punkt pro drei Schwingungen abgetastet wird. Daß diese Abtasthäufigkeit aber keinesfalls ausreichend ist, zeigt sich darin, daß sich dieser Effekt bei geringer Änderung der Vorgabefrequenz sofort stören läßt und die Versuchsperson das Muster erst dann wieder

reproduzieren kann, wenn es mit mindestens dem Zweifachen seiner eigenen Frequenz abgetastet wird.

Die Beobachtung Altrock's (1), daß Folgemuster unter einer Frequenz von 0,5 Hz nicht mehr kontinuierlich verlaufen, sondern treppenförmige Korrektursprünge mit einer Verzögerung von 125 msec aufweisen, treffen auch für getastet dargebotene Vorgabemuster zu. Diese Tatsache begründet die Annahme, daß auch bei getasteten Vorgabemustern bis zu einer Frequenz - bzw. Geschwindigkeitsgrenze (in den durchgeführten Versuchen bei einer Amplitude von 10^0 und einer Frequenz von 0,5 Hz) nur das Tastfilter arbeitet, während der kontinuierliche Anteil des Systems erst oberhalb dieser Frequenzgrenze in Tätigkeit tritt.

Es ergab sich nun die Frage, ob die gefundenen Gesetzmäßigkeiten auch für Mischungen mehrerer Sinusfrequenzen zutreffen.

Man kann sich jede Zeitfunktion aus Überlagerungen von harmonischen Schwingungen verschiedener Frequenzen zusammengesetzt denken, die für periodische Signale in einem ganzzahligen Verhältnis stehen. So besteht beispielsweise ein Dreieck aus einer Grundwelle mit der zweiten, vierten, sechsten, achten usw. Oberwelle, deren Phasenbeziehungen 0^0 , 180^0 , 0^0 , 180^0 usw. betragen. Die in den Versuchen mit einem Wechsel von getastetem sinus- und dreieckförmigem Muster wiedergegebenen Kur-

venbilder wurden nach der Fourier-Analyse auf die Amplitudengröße und die Phasenbeziehungen der einzelnen reproduzierten Frequenzanteile untersucht und die ermittelten Werte mit denen der Vorgabe verglichen. Dabei zeigte sich, daß die Muster anscheinend nicht nach dem Frequenzinhalt, sondern nach dem Zeitverlauf erfaßt werden. Das geht daraus hervor, daß schon bei sehr niedrigen, zur eindeutigen Erfassung höherer im Dreieckmuster enthaltener Frequenzen keinesfalls ausreichenden, Tastverhältnissen die beiden Muster zum Teil recht gut voneinander unterschieden werden. Für die Beurteilung der Muster nach dem Zeitverlauf spricht auch das Fehlen der Bildung aller Differenzfrequenzen bei geringer Tastung, wie sie bei einem einfachen linearen Abtastsystem zu erwarten wären. Dagegen wird von Anfang an eine Folge gebildet, deren Dreieckform sich um so deutlicher heraushebt, je besser der Zeitverlauf durch die Tastung beschrieben und damit für den Menschen erfäßbar wird. Hierbei ist die Dreiecknachbildung oft besser als entsprechend der Abtasttheorie zu erwarten wäre.

Für die "einfachen" periodischen Muster zeigte sich, daß sowohl bei einer Grundwellengeschwindigkeit von 0,5 Hz als auch von 1,0 Hz eine eindeutige und sichere Folge erst ab einer Abtasthäufigkeit von 12:1 erreicht wird, d.h., wenn auch die höchste Frequenz mit vier Tastpunkten pro Schwingung erfaßt wird. Die bereits in den Versuchen mit getasteten einfachen Sinusschwingungen beobachtete Tatsache, daß schon bei einem Tast-

verhältnis von 2 : 1 vielfach eine vorgabegetreue Folge erzielt wird, die im Verlaufe einer weiteren Erhöhung der Abtasthäufigkeit wieder verlorengeht und erst nach Erreichung der Tastgrenze wieder sicher auftritt, zeigte sich in einem Falle auch bei einem "einfachen" periodischen Muster: Bei einer Abtasthäufigkeit von 6 : 1 reproduziert die Vp. Sa. das Muster bereits recht gut, obwohl dieses Tastverhältnis gerade ausreicht, um die zweite Oberwelle mit dem Zweifachen ihrer eigenen Frequenz abzutasten. Im Verlaufe der folgenden Tasterhöhung verliert sich diese Folge jedoch sofort wieder und stellt sich sicher erst ab einer Tastung von 12 : 1 ein.

Auch diese Versuche zeigten, daß die Grenztastverhältnisse nicht für alle Personen gleich sind, sondern daß auch die persönlichen Fähigkeiten, getastete Mischungen harmonischer Schwingungen zu erkennen, einer gewissen Schwankung unterliegen.

Dagegen ergab sich aus den Versuchen mit dem "komplizierten" periodischen Muster von gleicher Grundwellenfrequenz und gleichen Frequenz- und Amplitudenverhältnissen, aber geänderten Phasenbeziehungen, daß das Muster - nur mit einer einzigen Ausnahme - nicht richtig reproduziert wird, auch wenn die Abtasthäufigkeit nach den bisherigen Erkenntnissen dazu voll ausreichen würde. Auch aus dem Gedächtnis wird das richtige Kurvenbild nicht nachgebildet, wie es bei dem "einfachen" Muster der Fall ist; das bedeutet also, daß das Muster in seiner wahren Form nicht erfaßt wird. Man kann des-

halb sagen, die Fähigkeit, aus einer Tastung ein Vorgabemuster zu erkennen, hängt zweifellos von der Gestalt des Musters ab, d.h., es gibt Muster, die nicht oder nur sehr ungenau reproduziert werden, während andere "Vorzugsmuster" selbst bis zu höheren Frequenzen recht deutlich erkennbar sind. Auch daraus ist zu schließen, daß die angebotenen Muster nicht nach der Frequenz der in ihnen enthaltenen Schwingungen, sondern nach ihrem Formenkriterium analysiert werden.

Nach dem gleichen Prinzip werden auch nichtperiodische Mischungen harmonischer Schwingungen ausgewertet. Die zunehmende Qualität der Wiedergabe des Musters mit steigender Tastfrequenz beruht daher nicht auf der intensiveren Erfassung der Einzelfrequenzen, sondern auf einer besseren Beschreibung des Zeitverlaufes des Musters.

Alle diese Ergebnisse weisen genau wie die von Vossius und Hummel (10) eindeutig darauf hin, daß die Verarbeitung des optischen Signales für die Willkürbewegung der Hand nach den oben schon mehrfach beschriebenen Kriterien einer eigenen Bewertung und Nachbildung der Muster vorgenommen wird. Bei getastet dargebotenen Mustern werden dabei nur die Frequenzanteile bevorzugt wiedergegeben, die nach dem Abtasttheorem von Shannon als eindeutig zu gelten hätten, ohne zu berücksichtigen, ob damit den wirklichen Verhältnissen entsprechende Muster entstehen. Die höheren Zentren treffen somit eine Auswahl. Hierbei können auch echte Fehlleistungen auftreten, wie die Versuche lehren, bei

denen einfache Sinusschwingungen mit nach dem Shanon'schen Abtasttheorem durchaus ausreichender Häufigkeit abgetastet, aber mit völlig abweichender Frequenz wiedergegeben werden. Zum Beispiel wird bei einer Tastfrequenz von 8 Hz eine Vorgabe von 2,5 Hz mit 1,79 Hz oder eine Vorgabe von 1,75 Hz mit 1,4 Hz beantwortet.

Die Ergebnisse zeigen also, daß die bisherige Betrachtungsweise des Systems der Willkürbewegung der Hand als ein im ganzen mit den Hilfsmitteln der linearen Systemtheorie zu beschreibendes System nicht aufrecht erhalten werden kann. Sie unterstützen damit die von Vossius gemeinsam mit Hummel (10) gefundenen Tatsachen einer Umwandlung des Reizmusters, die in erster Beschreibung von den Autoren als eine aktive Musternachbildung bezeichnet wurde. Mit ihrer Hilfe kann aber ebensowenig wie mit der Beschreibung dieser Autoren eine exakte Aussage über die Arbeitsweise dieses Systems gemacht werden; die Versuche engen also nur den Bereich der Möglichkeiten ein, die für seinen Aufbau infrage kommen.

Zusammenfassung

Es wurden Versuche mit getastet dargebotenen Vorgabemustern durchgeführt. Dazu wurden einfache sinusförmige Muster oder aus mehreren Sinusschwingungen zusammengesetzte Mischfrequenzen mit sowohl periodischem als auch aperiodischem Charakter als Reizmuster gewählt.

Als wesentliches Ergebnis der Versuche zeigte sich, daß die höheren Zentren das dargebotene Reizmuster nicht entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der linearen Abtasttheorie verarbeiten, sondern den Zeitverlauf des Musters zu erfassen und, wenn möglich, seinen Verlauf vorherzusagen versuchen.

Entsprechend dem Abtasttheorem von Shanon kann ein Muster nur dann richtig nachgebildet werden, wenn es mit mindestens dem Doppelten der höchsten in ihm enthaltenen Frequenz abgetastet wird.

Diese obere Grenze wird jedoch nur in Ausnahmefällen erreicht. Im allgemeinen muß das Muster mit mindestens der vierfachen Frequenz der höchsten in ihm enthaltenen Schwingung abgetastet werden, damit es von der Versuchsperson eindeutig erkannt und reproduziert werden kann.

Durch diese Ergebnisse wurden die Beobachtungen von

Vossius und Hummel (10) bestätigt, daß bei dem System der Willkürbewegung der Hand im Bereich der höheren Zentren ein Vorgang stattfindet, der quasi als aktive Musternachbildung aufgefaßt werden kann.

Die Ergebnisse und ihre Folgerungen werden im einzelnen diskutiert.

Literaturverzeichnis

1. ALTROCK, W. Inaug.-Diss., Frankfurt/M., 1961
2. ELLSON, D.Y. Psychol. Review 56, 9, 1949, zit. nach 3.
3. MAYNE, R. Electr. Engng. 70, 207, 1951
4. SHANON, C.E. Bell Syst. Techn. I. Bd. 27, 1948
5. STARK, L.,
 M. IIDA und
 P.A. WILLIS Biophysical J. 1, 279, 1961
6. SÜNDERHAUF, A. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 136, 6,
 S. 837 - 852, 1960
7. TUSTIN, A. Journ. Inst. of Electr. Eng.(London) 94,
 part 11 a, 190, zit. nach 3.
8. VOSSIUS, G. Akad. d. Wiss. u. Lit. 4, 107 - 127, 1957
9. VOSSIUS, G. und
 A. CHOUDHRY Pflügers Arch. Physiol. 268, 75, 1958
10. VOSSIUS, G. und
 J.C. HUMMEL noch nicht veröffentlicht
11. VOSSIUS, G. Aufn. u. Verarb. v. Nachr. durch Orga-
 nismen, S. 149 - 157, Vortrag in
 Stuttgart 1961
12. WESTHEIMER, G. A.M.A. Arch. Ophth. 52, 655 a 932, 1954

Tastung	Vorgabe	Vp	erste Folge bei	Tastverhältnis	eindeutige Folge ab	Tastverhältnis
2 Hz	2 - 0,25 Hz	Sa	1,0 Hz	2 : 1	0,5 Hz	4 : 1
		Hu	1,0 Hz	2 : 1	0,5 Hz	4 : 1
4 Hz	4 - 0,5 Hz	Sa	2,0 Hz	2 : 1	1,0 Hz	4 : 1
		Hu	2,0 Hz	2 : 1	1,0 Hz	4 : 1
8 Hz	8 - 1,0 Hz	Sa	2,0 Hz	4 : 1	1,0 Hz	8 : 1
		Hu	2,0 Hz	4 : 1	1,0 Hz	8 : 1

Tabelle 1 zeigt die zur eindeutigen Nachbildung von sinusförmigen Vorgabemustern notwendigen Tastverhältnisse, wenn bei konstanter Tastfrequenz die Frequenz der Vorgabe in ganzzahligen Verhältnissen zu dieser gesenkt wird.
(Verhältnisse von Tastfrequenz zur Vorgabefrequenz: 1 : 1, 4 : 3, 2 : 1, 4 : 1, 8 : 1)

Tastung	Vorgabe	Vp	eindeutige Folge bis	Tastverhältnis
2 Hz	0,25 - 2 Hz	Sa	1,0 Hz	2 : 1
		Hu	1,0 Hz	2 : 1
4 Hz	0,5 - 4 Hz	Sa	1,5 Hz	2,66 : 1
		Hu	1,5 Hz	2,66 : 1
8 Hz	1,0 - 8 Hz	Sa	2,0 Hz	4 : 1
		Hu	2,0 Hz	4 : 1

Tabelle 2 zeigt die Tastverhältnisse, bis zu denen bei konstanter Tastfrequenz und in ganzzahligen Verhältnissen zur Tastung zunehmenden Vorgabefrequenzen eine eindeutige Folge erzielt wird.
(Verhältnisse von Tastung zur Vorgabe: 8 : 1, 4 : 1, 2 : 1, 4 : 3, 1 : 1)

Tastung	Vorgabe	Vp	erste Folge bei	Tastver- hältnis	eindeutige Folge ab	Tastver- hältnis
1 Hz	10 - 0,25 Hz	Sa	0,5 Hz	2 : 1	0,5 Hz	2 : 1
		Hu	0,5 Hz	2 : 1	0,5 Hz	2 : 1
		We	0,5 Hz	2 : 1	0,5 Hz	2 : 1
2 Hz	10 - 0,25 Hz	Sa	0,5 Hz	4 : 1	0,5 Hz	4 : 1
		Hu	1,0 Hz	2 : 1	0,65 Hz	~ 3,1 : 1
		We	1,0 Hz	2 : 1	1,0 Hz	2 : 1
4 Hz	10 - 0,25 Hz	Sa	2,0 Hz	2 : 1	1,0 Hz	4 : 1
		Hu	2,0 Hz	2 : 1	1,25 Hz	3,5 : 1
		We	2,0 Hz	2 : 1	1,5 Hz	2,66 : 1
8 Hz	10 - 0,25 Hz	Sa	2,0 Hz	4 : 1	2,0 Hz	4 : 1
		Hu	4,0 Hz	2 : 1	2,25 Hz	~ 3,55 : 1
		We	4,0 Hz	2 : 1	2,5 Hz	3,2 : 1
10 Hz	10 - 0,25 Hz	Sa	2,25 Hz	4,44 : 1	2,25 Hz	4,44 : 1
		Hu	5,0 Hz	2 : 1	2,5 Hz	4 : 1
		We	2,5 Hz	4 : 1	2,5 Hz	4 : 1

Tabelle 3 zeigt die zur eindeutigen Nachbildung eines sinusförmigen Vorgabemusters notwendigen Tastverhältnisse, wenn bei konstanter Tastfrequenz die Frequenz der Vorgabe allmählich in kleinen Sprüngen bis zur Erreichung einer eindeutigen Folge gesenkt wird.

Grund- welle	Tastung		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇
0,5 Hz	2 Hz	Vorgabe	1,161	1,186	1,166	0,120	0,062	0,013	0,040
		Folge	1,874	1,243	0,714	0,306	0,163	0,091	0,027
0,5 Hz	4 Hz	Vorgabe	1,055	1,116	1,118	0,065	0,049	0,038	0,027
		Folge	0,844	0,732	1,002	1,092	0,147	0,065	0,099
0,5 Hz	6 Hz	Vorgabe	1,138	1,151	1,134	0,098	0,046	0,040	0,023
		Folge	1,013	1,117	1,508	0,081	0,023	0,107	0,042
0,5 Hz	8 Hz	Vorgabe	1,141	1,170	1,120	0,139	0,079	0,041	0,053
		Folge	1,064	1,440	1,525	0,223	0,063	0,061	0,080
0,5 Hz	12 Hz	Vorgabe	1,132	1,156	1,190	0,085	0,079	0,038	0,010
		Folge	0,850	1,291	1,350	0,119	0,112	0,058	0,034
0,5 Hz	dunkel(Vorgabe) ohne Vorgabe nachgebilde- tes Muster	Vorgabe	1,165	1,111	1,114	0,093	0,052	0,071	0,085
		Folge	0,776	0,811	1,495	0,105	0,095	0,059	0,050
1,0 Hz	4 Hz	Vorgabe	1,186	1,184	1,143	0,058	0,044	0,031	0,034
		Folge	0,569	0,840	0,804	0,125	0,032	0,054	0,028
1,0 Hz	6 Hz	Vorgabe	1,103	1,143	1,157	0,056	0,038	0,018	0,028
		Folge	0,288	0,619	0,825	0,691	0,079	0,026	0,030
1,0 Hz	8 Hz	Vorgabe	1,133	1,167	1,154	0,102	0,072	0,028	0,049
		Folge	0,172	0,211	0,338	0,546	0,822	0,172	0,019
1,0 Hz	12 Hz	Vorgabe	1,148	1,173	1,130	0,046	0,043	0,020	0,028
		Folge	0,600	0,945	1,371	0,177	0,059	0,030	0,027
1,0 Hz	dunkel(Vorgabe) ohne Vorgabe nachgebilde- tes Muster	Vorgabe	1,145	1,163	1,144	0,040	0,039	0,005	0,034
		Folge	0,436	0,765	1,288	0,078	0,077	0,030	0,023

Tabelle 4a zeigt die für die Vp. We. ermittelten Amplitudenbeziehungen der in Vorgabe und Folge des "einfachen" periodischen Musters enthaltenen Schwingungen.

Grundwelle	Tastung		Ph ₁	Ph ₂	Ph ₃	Ph ₄	Ph ₅	Ph ₆	Ph ₇
0,5 Hz	2 Hz	Vorgabe	o	89	183	185	261	248	319
		Folge	o	117	232	340	109	226	311
0,5 Hz	4 Hz	Vorgabe	o	89	178	216	333	103	245
		Folge	o	124	235	295	119	298	98
0,5 Hz	6 Hz	Vorgabe	o	90	176	73	161	242	332
		Folge	o	111	180	152	69	63	189
0,5 Hz	8 Hz	Vorgabe	o	90	181	196	274	319	14
		Folge	o	96	177	107	234	284	57
0,5 Hz	12 Hz	Vorgabe	o	86	174	186	281	10	18
		Folge	o	108	168	231	311	48	98
0,5 Hz	dunkel (Vorgabe) ohne Vorgabe nach- gebildetes Muster	Vorgabe	o	84	166	176	325	156	293
		Folge	o	133	227	193	324	137	114
1,0 Hz	4 Hz	Vorgabe	o	89	178	176	231	280	323
		Folge	o	58	85	244	257	151	167
1,0 Hz	6 Hz	Vorgabe	o	91	181	220	321	88	273
		Folge	o	162	206	155	80	172	155
1,0 Hz	8 Hz	Vorgabe	o	89	180	190	271	320	335
		Folge	o	157	196	164	149	187	189
1,0 Hz	12 Hz	Vorgabe	o	91	181	191	269	59	320
		Folge	o	80	123	171	274	73	280
1,0 Hz	dunkel (Vorgabe) ohne Vorgabe nach- gebildetes Muster	Vorgabe	o	89	178	160	264	135	310
		Folge	o	96	168	70	224	178	132

Tabelle 4 b zeigt die für die Vp. We. ermittelten Phasenbeziehungen der in Vorgabe und Folge des "einfachen" periodischen Musters enthaltenen Schwingungen.

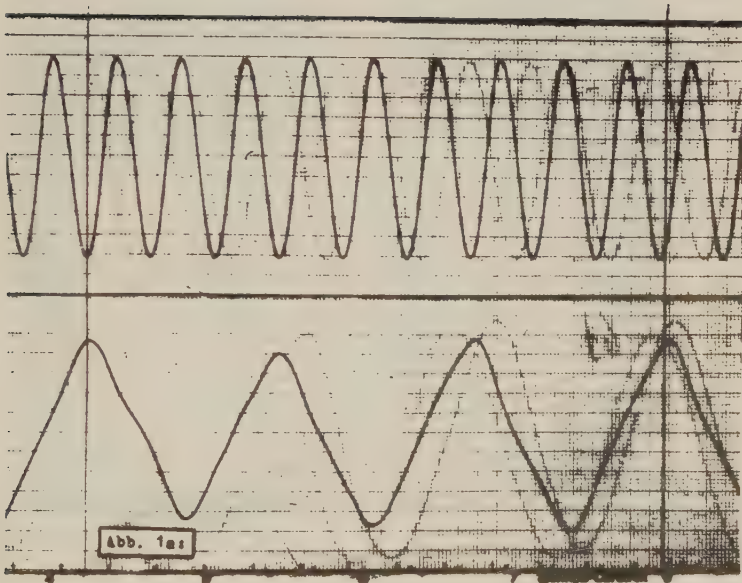


Abb. 1a: Differenzfolge von 0,5 Hz bei einer Tastfrequenz von 2 Hz und einer Vorgabefrequenz von 1,5 Hz. Im oberen Teil der Abbildung wird das Vorgabemuster, darunter die gleichzeitig registrierte Folgekurve dargestellt. Die kleinen Zacken auf der untersten Linie markieren die genauen Zeitpunkte der Tastung.

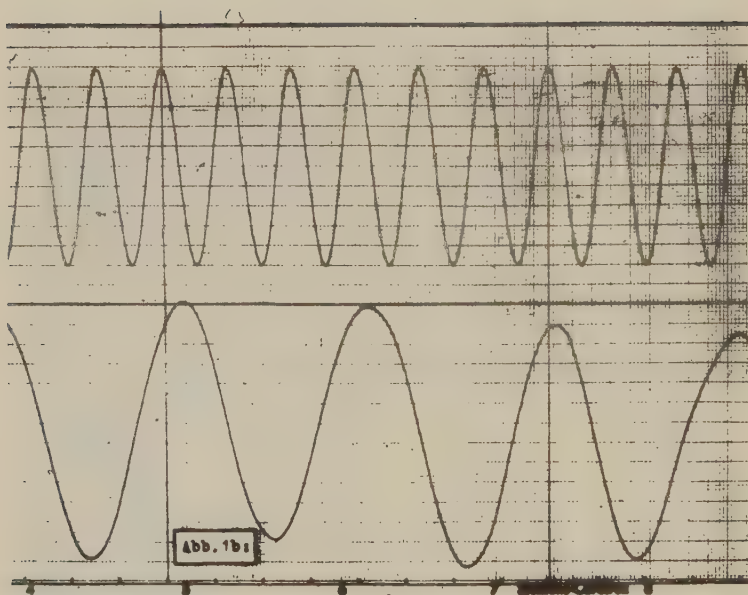


Abb. 1b: Differenzfolge von 1 Hz bei einer Tastfrequenz von 4 Hz und einer Vorgabefrequenz von 3 Hz.

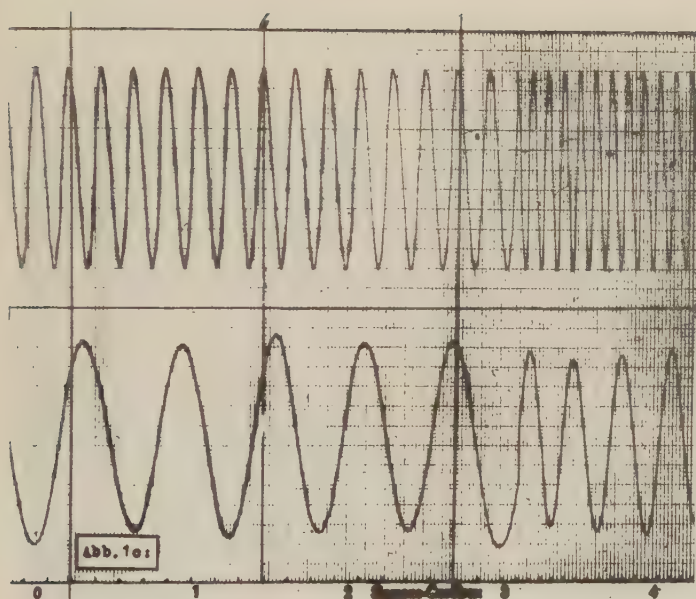


Abb. 1c: Differenzfolge von 2 Hz bei einer Tastfrequenz von 8 Hz und einer Vorgabefrequenz von 6 Hz.

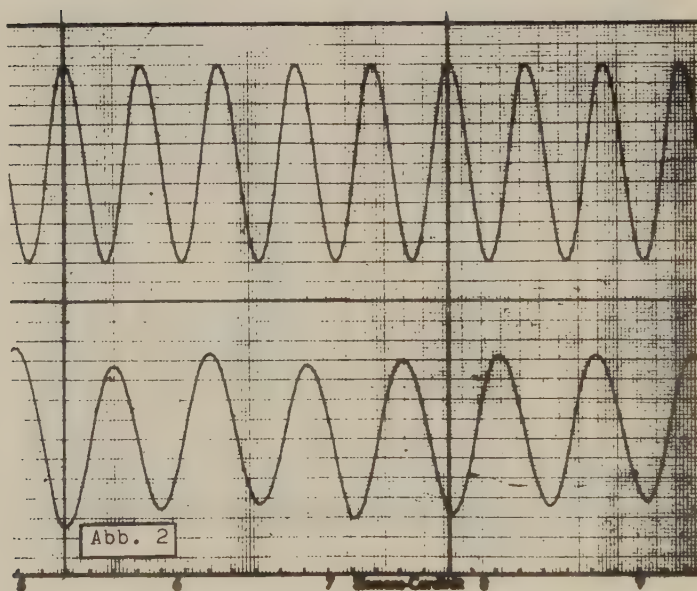


Abb. 2: Mit $1/4$ der Tastfrequenz synchronisiertes, unabhängig von der Vorgabefrequenz von 2,5 Hz gebildetes, Folgemuster von 2 Hz bei einer Tastfrequenz von 8 Hz.

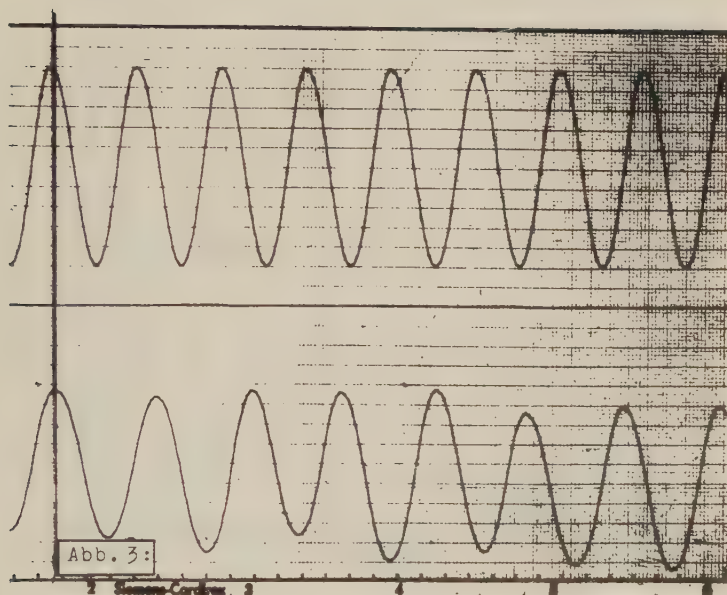


Abb. 3: Mit $\frac{1}{4}$ der Tastfrequenz synchronisiertes, unabhängig von der Vorgabefrequenz von 2,25 Hz gebildetes, Folgemuster von 2 Hz bei einer Tastfrequenz von 8 Hz.

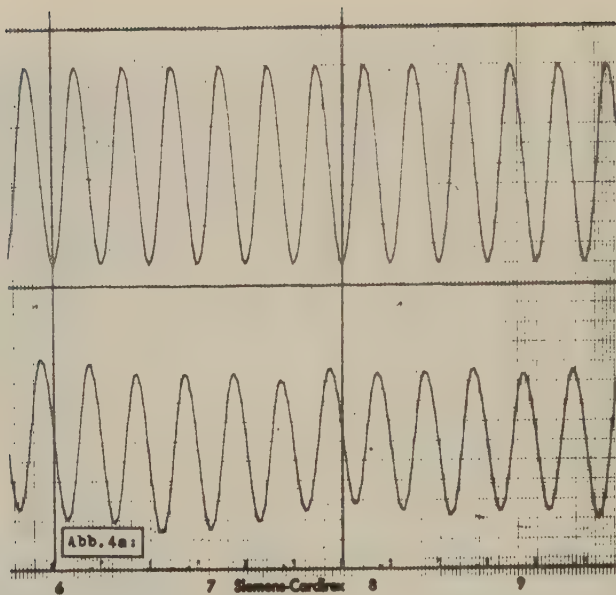


Abb. 4a: Folgefrequenz von 4 Hz bei einer Vorgabe von 4 Hz und einer Tastung von ebenfalls 4 Hz (sogenannte Triggerung der Folgebewegung).

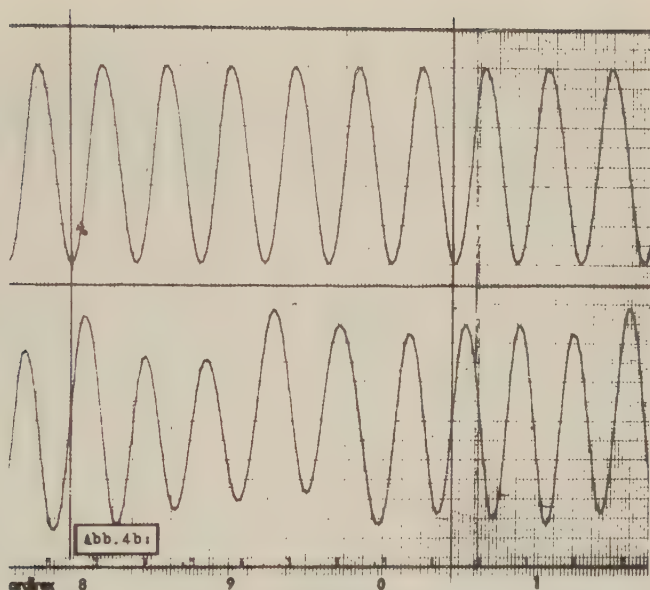


Abb. 4b: Folgefrequenz von 3 Hz bei einer Vorgabe von 3 Hz und einer Tastung von 4 Hz; dabei werden je drei Schwingungen mit nur vier Tastpunkten erfasst !

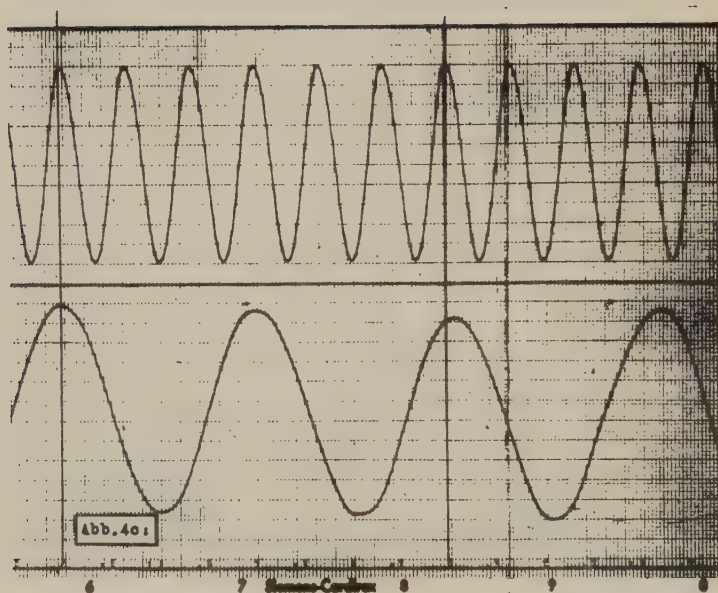


Abb. 4c: Differenzfolge von 1 Hz bei einer Vorgabefrequenz von 3 Hz und einer Tastfrequenz von 4 Hz.

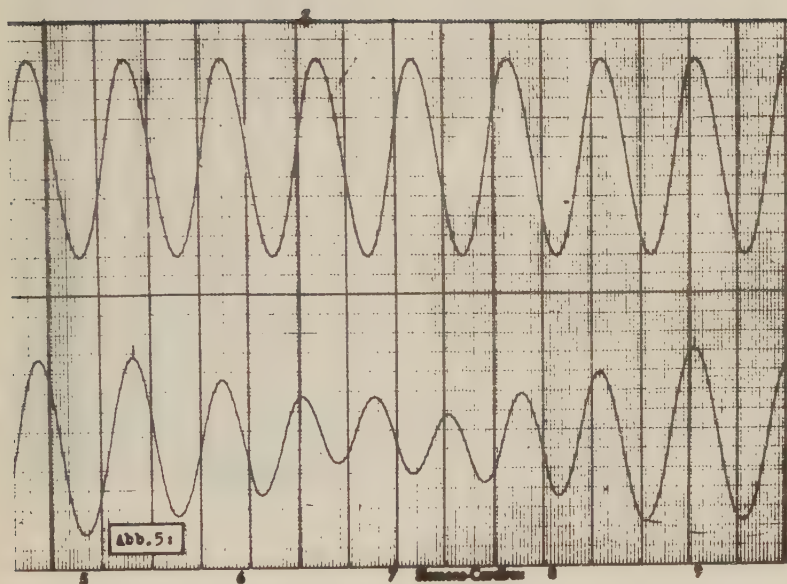


Abb. 5: Phänomen der Schwebung bei geringer Unganzzahligkeit von Vorgabe und Folge bei einem Tastverhältnis von ca. $2:1$. Die Frequenz der Vorgabe beträgt 2 Hz , die Tastfrequenz ca. $3,87\text{ Hz}$.

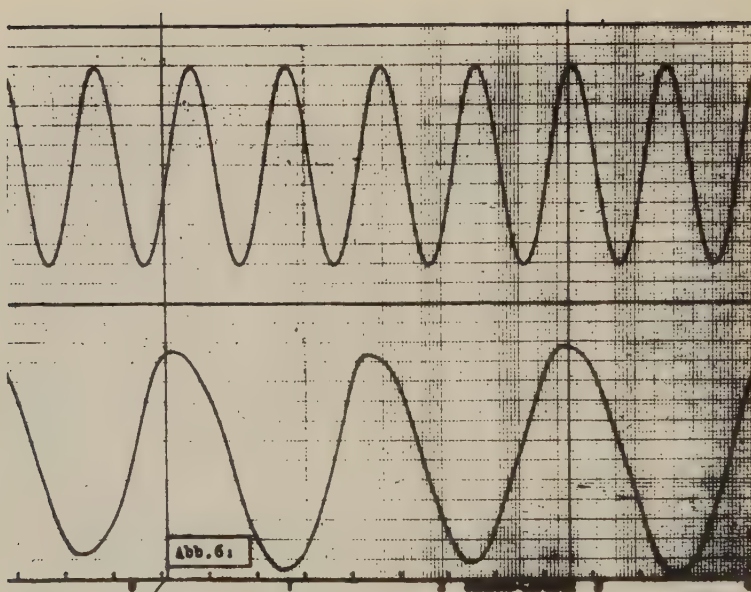


Abb. 6: Mit $1/4$ der Tastfrequenz synchronisiertes Folgemuster von etwa halber Frequenz der Vorgabe bei einer Tastung von 2 Hz und einer Vorgabe von 1 Hz.

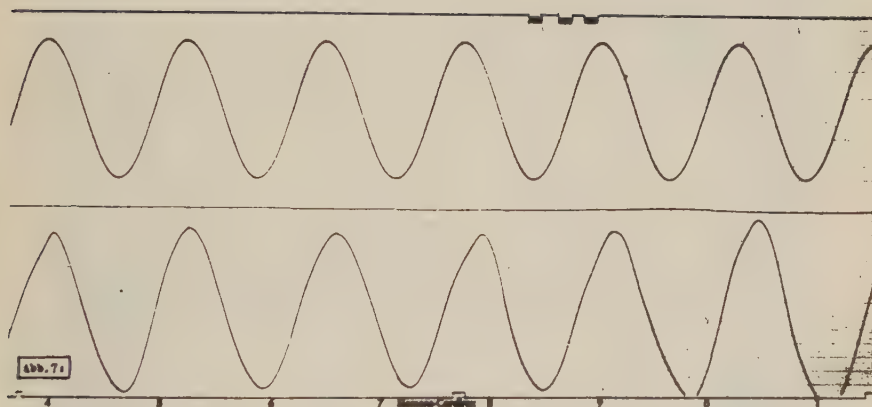


Abb. 7: Reproduktion eines geübten sinusförmigen Musters mit konstanter Frequenz der Vorgabe von 0,5 Hz und allmählich abnehmender Tastfrequenz. Das Muster wird bis zu einer Tastung von 0,166 Hz befolgt, obwohl dabei nur noch ein Tastpunkt auf je drei Vorgabeschwingungen entfällt !

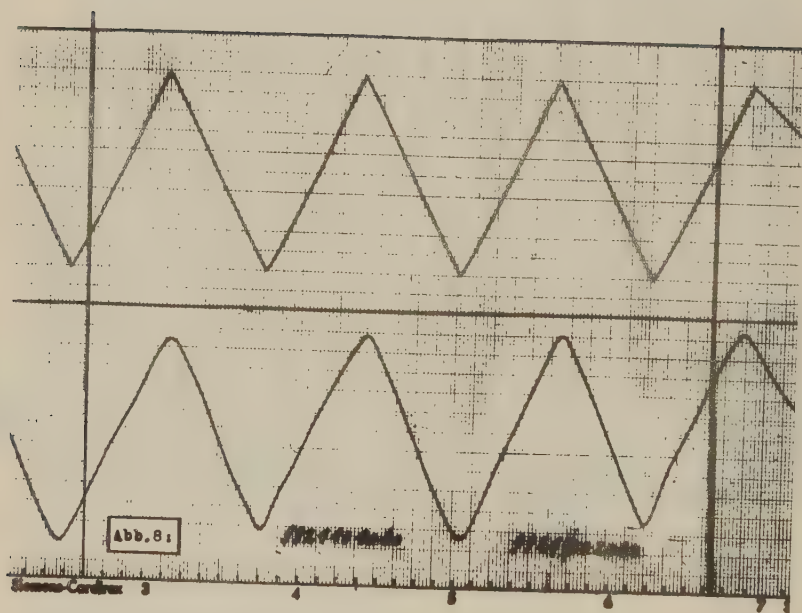


Abb. 8: Gut nachgebildetes dreieckförmiges Muster einer Frequenz von 0,5 Hz (vor Übung des Dreiecks) bei einem Tastverhältnis von 10 : 1.

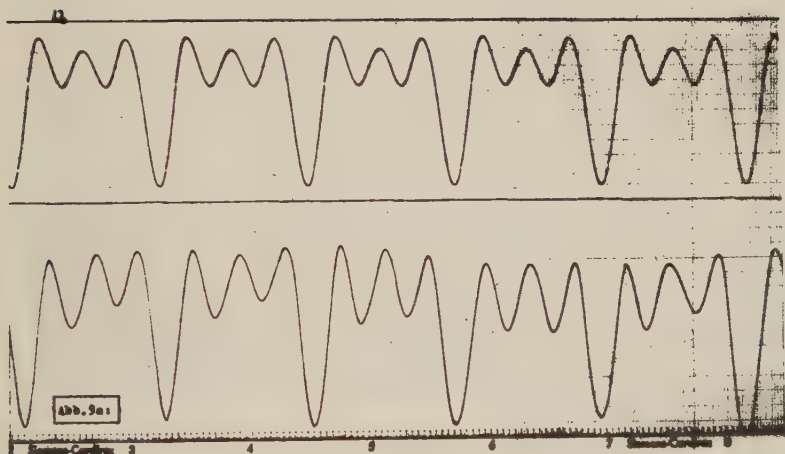


Abb. 9 a: Aus drei harmonischen Schwingungen zusammengesetztes "einfaches" periodisches Muster. Die Frequenzen der Schwingungen verhalten sich zueinander wie die Verhältnisse 1 : 2 : 3, die Phasenbeziehungen der beiden Oberwellen betragen 90° und 180° . Das Muster wird mit einer Grundwellengeschwindigkeit von 0,5 Hz und einer Tastfrequenz von 12 Hz dargeboten.

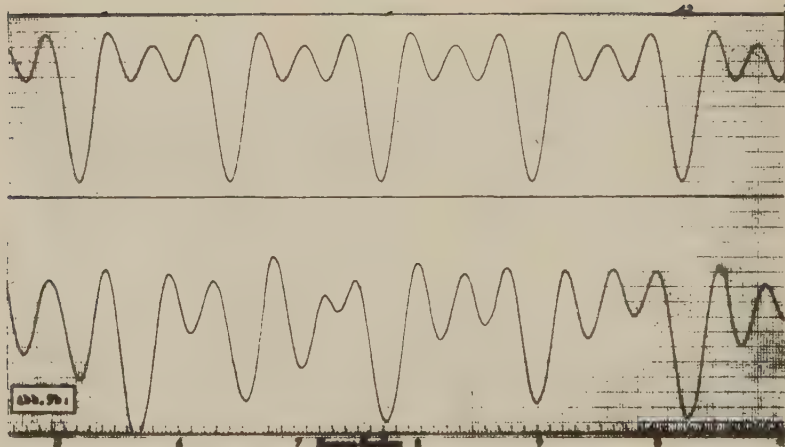


Abb. 9b: Das gleiche Muster wie in Abb. 9a, aber mit einer Grundwellengeschwindigkeit von 1,0 Hz und einer Tastfrequenz von 16 Hz dargeboten.

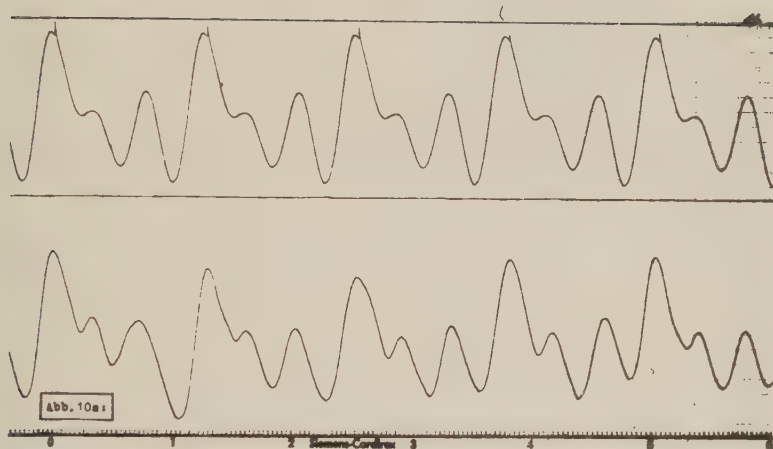


Abb. 10a: Aus drei harmonischen Schwingungen zusammengesetztes "kompliziertes" periodisches Muster. Die Frequenzen der Schwingungen verhalten sich zueinander wie die Verhältnisse $1:2:3$, die Phasenbeziehungen der beiden Oberwellen betragen 270° und 270° . Das Muster wird mit einer Grundwellengeschwindigkeit von $0,5$ Hz und einer Tastfrequenz von 12 Hz dargeboten.

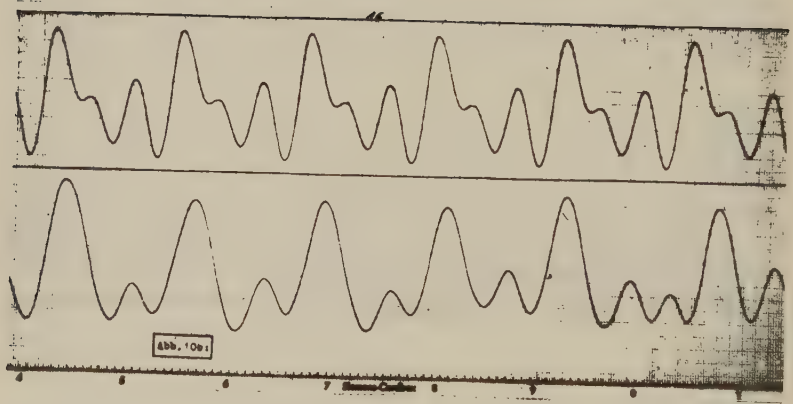


Abb. 10b: Das gleiche Muster wie in Abb. 10a, aber mit einer Grundwellengeschwindigkeit von 1,0 Hz und einer Tastfrequenz von 16 Hz dargeboten.

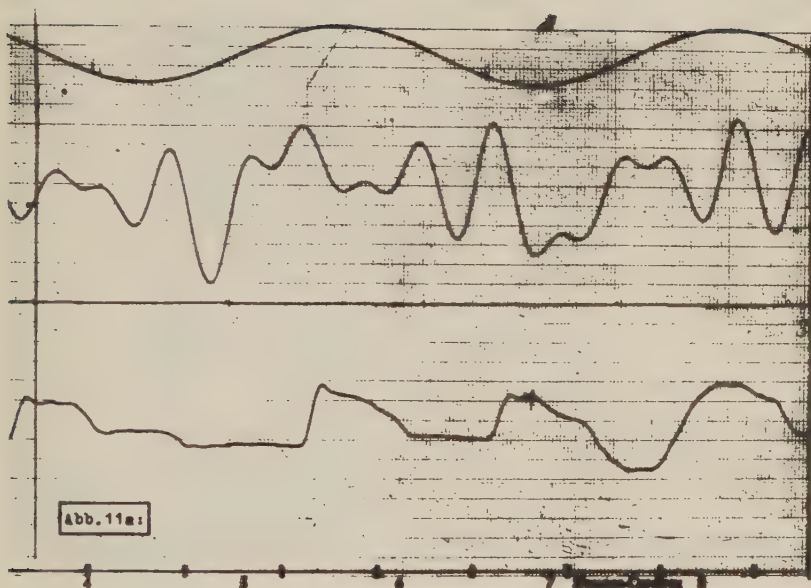


Abb. 11 a: Aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetztes nichtperiodisches Muster. Die Frequenz der langsamsten Schwingung beträgt 0,25 Hz, die Tastfrequenz 1 Hz.
(Die obere Kurve stellt den Zeitverlauf der langsamsten Schwingung dar; darunter ist das Vorgabemuster, unten das Folgemuster abgebildet. Die kleinen Zacken auf der untersten Linie markieren die genauen Zeitpunkte der Tastung.)

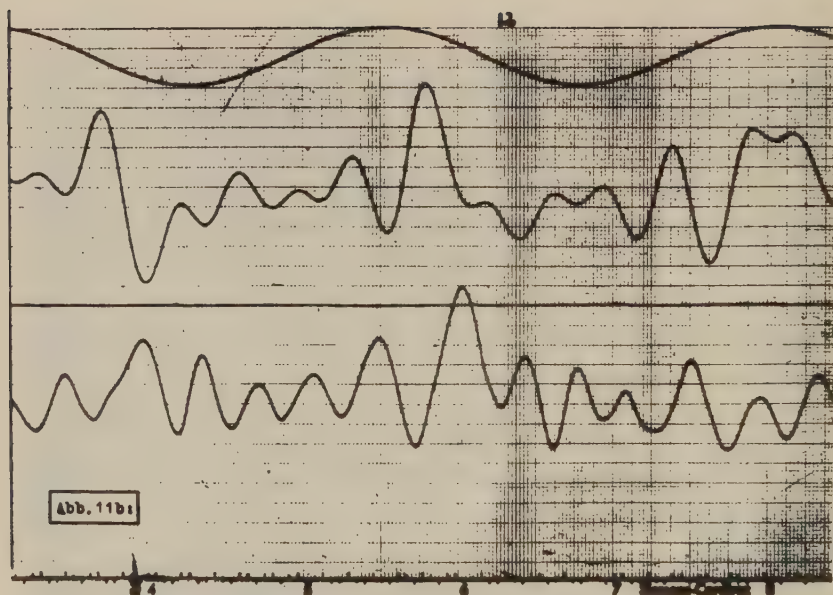


Abb. 11 b: Aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetztes nichtperiodisches Muster. Die Frequenz der langsamsten Schwingung beträgt 0,25 Hz, die Tastfrequenz 12 Hz.

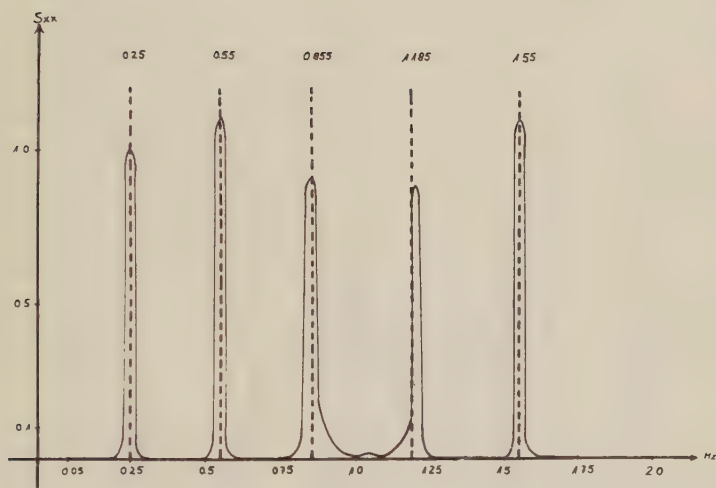


Abb. 12: Frequenzspektrum eines aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetzten aperiodischen Vorgabemusters mit einer Frequenz der langsamsten Schwingung von 0,25 Hz. (Die Abszisse gibt die Frequenz in Hz an, die Ordinate, deren Einheiten willkürlich gewählt sind, die Amplituden.)

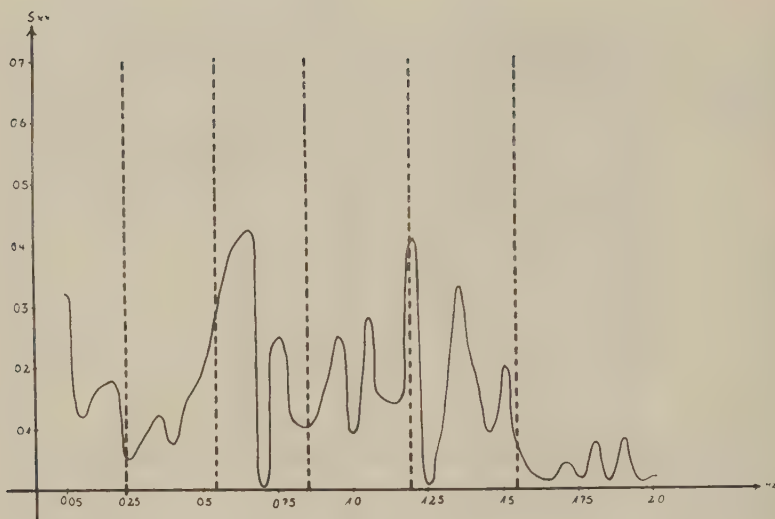


Abb. 13: Frequenzspektrum einer Folgekurve auf ein aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetztes aperiodisches Vorgabemuster mit einer Frequenz der langsamsten Schwingung von 0,25 Hz. Die Tastfrequenz beträgt 4,0 Hz. Neben einer Vielzahl nicht im Vorgabemuster enthaltener Schwingungen tritt nur die vierte Welle deutlicher in Erscheinung. (Die senkrecht gestrichelten Linien bezeichnen die Lage der Sollfrequenzen.)

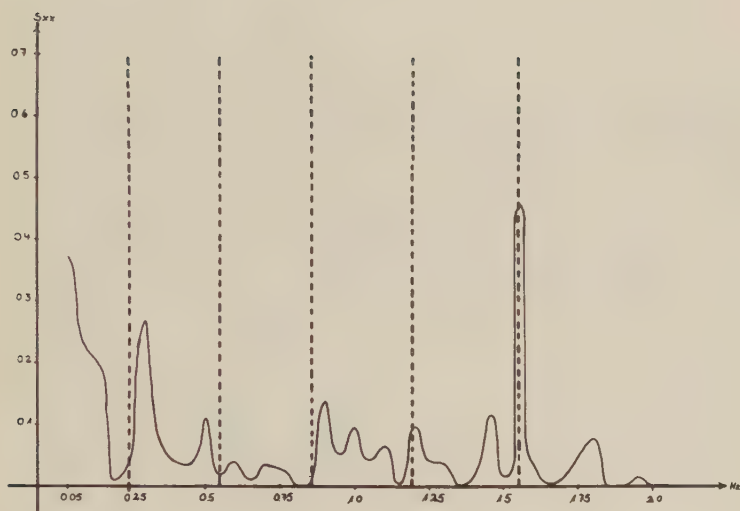


Abb. 14: Frequenzspektrum einer Folgekurve auf ein aus fünf harmonischen Schwingungen zusammengesetztes aperiodisches Vorgabemuster mit einer Frequenz der langsamsten Schwingung von 0,25 Hz. Die Tastfrequenz beträgt 10,0 Hz. Nur die fünfte Schwingung hebt sich in deutlicher Weise von den nicht in der Vorgabe enthaltenen Frequenzanteilen ab. (Die senkrecht gestrichelten Linien bezeichnen die Lage der Sollfrequenzen.)

Herrn Prof. Dr. med. K. Wezler, dem Direktor des Institutes für Animalische Physiologie der Johann Wolfgang Goethe - Universität zu Frankfurt am Main, möchte ich an dieser Stelle für das freundliche Entgegenkommen, in seinem Institut experimentell arbeiten zu dürfen, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Das Thema dieser Arbeit wurde mir in dankenswerter Weise von Herrn Priv. Doz. Dr. med. G. Vossius überlassen.

Herrn Priv. Doz. Dr. Vossius danke ich außerdem für die wertvolle Unterstützung, die er mir bei der Durchführung der Untersuchungen zuteil werden ließ.

Verzeichnis meiner akademischen Lehrer

Prof. Dr. med., Dr. med. dent., Dr. phil. Artelt
Prof. Dr. phil. Czerny
Prof. Dr. med. Felix
Prof. Dr. med. Frey
Prof. Dr. med. Frick
Prof. Dr. phil. Giersberg
Prof. Dr. med. Greef
Prof. Dr. rer. nat. Halbsguth
Prof. Dr. med., Dr. med. dent. Hauser
Prof. Dr. med. Jürgens
Prof. Dr. med. Kahlau
Priv. Doz. Dr. med. Kleinschmidt
Lehrbeauftragter Dr. med. dent. Koller
Lehrbeauftragter Dr. med., Dr. med. dent. Kreter
Prof. Dr. med. dent. Kuck
Prof. Dr. med. Kühne
Priv. Doz. Dr. med. Landes
Prof. Dr. med. Luff
Priv. Doz. Dr. med. Martin
Prof. Dr. med. Ortmann
Prof. Dr. med. dent. von Reckow
Priv. Doz. Dr. med. Ristow
Prof. Dr. phil. nat. Royen
Prof. Dr. med. Sandritter
Prof. Dr. med. Starck
Priv. Doz. Dr. med. W. Weber
Prof. Dr. med. Westermann
Priv. Doz. Dr. med. E. Westermann
Prof. Dr. med. Wezler
Prof. Dr. phil. Wieland
Priv. Doz. Dr. med. Zimmermann

Ich erkläre ehrenwörtlich, daß ich die der Medizinischen Fakultät der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel "Untersuchungen über die Willkürbewegung der menschlichen Hand mit getastet dargebotenen Reizmustern" im Institut für Animalische Physiologie der Johann Wolfgang Goethe - Universität zu Frankfurt am Main unter Leitung von Herrn Priv. Doz. Dr. med. G. Vossius mit seiner Unterstützung ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- und ausländischen Medizinischen Fakultät ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Vorliegende Arbeit wird zu einem späteren Zeitpunkt in einem noch nicht ausgewählten Publikationsorgan veröffentlicht.

Frankfurt am Main, den 20.11.1962

Friedrich Heuß

L e b e n s l a u f

Am 25. Mai 1937 wurde ich als Sohn des Fabrikanten Curt Wezel und seiner Ehefrau Hildegard, geb. Gricksch, in Greiz / Thüringen geboren.

Von 1943 bis 1951 besuchte ich die Volksschule und daran anschließend die Theo - Neubauer - Oberschule meiner Heimatstadt.

Im Dezember 1954 ergab sich für unsere Familie die Notwendigkeit, nach Westdeutschland zu übersiedeln, und ich mußte meine schulische Ausbildung wenige Wochen vor Beginn der schriftlichen Reifeprüfung abbrechen. Ab Mai 1955 wurde ich Schüler am Jung - Stilling - Aufbaugymnasium in Hilchenbach / Siegkreis und legte dort im Februar 1957 meine Reifeprüfung ab.

Danach begann ich mit dem Studium der Zahnmedizin und absolvierte die vorgeschriebene Anzahl der vorklinischen und klinischen Semester an der Johann Wolfgang Goethe - Universität in Frankfurt am Main. Die zahnärztliche Vorprüfung bestand ich im Oktober 1959 mit der Note "gut", und im Frühjahr dieses Jahres legte ich das Staatsexamen mit der Gesamtnote "gut" ab.

Friedrich Wezel

